

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.200435

# 基于 Gram-Charlier 级数的含风电电力系统 静态电压稳定概率评估

那广宇<sup>1</sup>, 魏俊红<sup>2</sup>, 王亮<sup>1</sup>, 王长江<sup>3</sup>

(1. 国网辽宁省电力有限公司, 辽宁 沈阳 110006; 2. 华电电力科学研究院有限公司东北分公司,  
辽宁 沈阳 110167; 3. 东北电力大学电气工程学院, 吉林 吉林 132012)

**摘要:** 可再生能源的波动性和随机性加剧了传统电力系统静态电压稳定评估的难度。为了有效计及风电出力不确定性对静态电压稳定评估的影响, 提出了一种计及风电出力不确定性的静态电压稳定概率评估方法。首先, 借助电力系统负荷裕度, 推导各节点负荷裕度对风电注入功率的灵敏度, 进而求解负荷裕度的各阶半不变量和负荷裕度的各阶矩。然后, 结合风电所连节点注入功率的各阶矩和半不变量, 对负荷裕度各阶矩进行 Gram-Charlier 展开, 以求取计及风电不确定性的负荷裕度概率分布, 进而实现电力系统静态电压稳定概率评估。最后, 通过 IEEE30 节点系统验证所提方法的准确性和有效性。

**关键词:** 负荷裕度; Gram-Charlier; 静态电压稳定; 半不变量法

## Probabilistic evaluation of power system static voltage stability with wind power uncertainty based on the Gram-Charlier expansion

NA Guangyu<sup>1</sup>, WEI Junhong<sup>2</sup>, WANG Liang<sup>1</sup>, WANG Changjiang<sup>3</sup>

(1. State Grid Liaoning Electric Power Co., Ltd., Shenyang 110006, China; 2. Huadian Electric Power Research Institute, Shenyang 110167, China; 3. School of Electrical Engineering, Northeast Electric Power University, Jilin 132012, China)

**Abstract:** The volatility and randomness of renewable energy have exacerbated the difficulty of evaluating static voltage stability in traditional power systems. In order to effectively account for the impact of wind power output uncertainty on static voltage stability assessment, first, the sensitivity of each node load margin to wind power injection power is derived through the power system load margin. Further, each order semi-invariant and each order moment of power system load margin are determined. Then, combining the various moments and semi-invariants of the injected power of the nodes connected to the wind power, the Gram-Charlier expansion of the various moments of the load margin is carried out. Thus the probability distribution of the load margin is obtained by taking into account the uncertainty of wind power to realize the probability assessment of the static voltage stability of the power system. Finally, the accuracy and effectiveness of the proposed method are verified by the IEEE30 node system.

This work is supported by the Science and Technology Project of State Grid Liaoning Electric Power Co., Ltd. (No. 2018YF-25) and the Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (No. SGTYHT17-JS-199).

**Key words:** load margin; Gram-Charlier; steady-state voltage stability; semi-invariant method

## 0 引言

随着环境问题的日益加剧, 电力系统在安全、

**基金项目:** 国网辽宁省电力有限公司科技项目资助“辽宁电网采用新能源主动支撑技术的稳定性研究”(2018YF-25); 国家电网有限公司科技项目资助“千万千瓦级分层接入直流送受端系统动态行为机理和协调控制措施研究”(SGTYHT17-JS-199)

持续、可靠供电的同时, 加速能源转型, 减少一次能源使用日益重要。近年来, 随着电网规模的不断扩大, 可再生能源与清洁能源的大范围投入<sup>[1]</sup>, 在提高电力系统运行经济性<sup>[2-3]</sup>与灵活性<sup>[4]</sup>的同时, 也导致传统电网运行风险的提高<sup>[5-6]</sup>, 运行工况的复杂化给电力系统造成了难以预测的潜在隐患。故研究此背景下的电力系统稳定性有着重要的现实意义<sup>[7-11]</sup>。

静态电压稳定是电力系统稳定性的关键部分

之一<sup>[12]</sup>。电力系统静态电压稳定通常采用代数方程来分析电网在小干扰下的电压稳定性。风电具有波动性和不确定性，风电的大规模接入导致了电力系统运行方式的随机变化，从而加剧了各个节点静态电压稳定的不确定性<sup>[13-17]</sup>。

常规静态电压稳定性研究以确定模型为基础，忽略了风电的随机性和负荷的不确定性，因此亟需研究不确定模型下的静态电压稳定概率评估算法<sup>[18-19]</sup>。当前，广泛使用的概率分析法主要包括蒙特卡洛法<sup>[20-22]</sup>、近似法<sup>[23-24]</sup>和解析法<sup>[25]</sup>等。基于随机采样的 Monte Carlo 法是通过系统状态进行随机抽样，对抽样数据进行潮流计算，判断系统运行状态的过程。在抽样数目较多时，可以方便地模拟电力系统各种不确定性因素，具有较高的精度，但需反复大量的抽样计算，耗时长，严重限制了其在实际工程中的应用。近似法不再对系统状态进行大量的抽样计算，而是依据不确定性变量的概率分布，近似分析待求量的统计特征，求解时间损耗少，所得输出不确定变量的均值与方差精确程度高，典型的如点估计法<sup>[26-28]</sup>以及一次二阶矩法。解析法采用数学假设对输出和输入的不确定变量进行线性化处理，获得输出不确定变量的概率分布，求解速度较快，其中获得广泛应用的主要有半不变量法。

为了准确表征含风电的系统中随机因素对静态电压稳定的影响，提出了一种计及风电随机性的静态电压稳定概率评估方法，选择负荷裕度作为静态电压稳定的衡量标准。为了获得风电不确定性下的负荷裕度分布，首先推导了各负荷节点负荷裕度与风电节点注入功率的灵敏度，然后采用半不变量法以及 Gram-Charlier 方法，通过风电功率分布得到负荷节点的负荷裕度分布，并对每个节点进行静态电压稳定分析。最后，采用 IEEE30 测试系统来验证所提静态电压稳定概率评估方法的合理性和准确性。

## 1 负荷裕度灵敏度

### 1.1 负荷裕度指标

首先介绍基于耦合单端口计算负荷裕度的方法<sup>[29]</sup>。基于耦合单端口理论，电力系统可以被多端口网络或耦合单端口描述。耦合单端口理论下电力系统运行状态可以表示为

$$\begin{bmatrix} -I_L \\ 0 \\ I_G \end{bmatrix} = [Y] \begin{bmatrix} V_L \\ V_T \\ V_G \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{LL} & Y_{LT} & Y_{LG} \\ Y_{TL} & Y_{TT} & Y_{TG} \\ Y_{GL} & Y_{GT} & Y_{GG} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_L \\ V_T \\ V_G \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中： $Y$ 为节点导纳矩阵； $V$ 、 $I$ 分别为电压相量与电流相量；下标 L、T、G 表示负荷母线、联络母线、

发电机母线；下标 LL、LT、LG、TL、TT、TG、GL、GT、和 GG 用来表示  $Y$  导纳矩阵的相应子矩阵(例如， $Y_{LT}$  表示负荷母线和联络母线之间的导纳矩阵)。

由于中间节点对于负荷裕度影响较小，所以可以忽略联络母线的电压量。消除了联络母线的电压相量之后，可得

$$\begin{cases} V_L = KV_G - Z_{LL}I_L \\ Z_{LL} = (Y_{LL} - Y_{LT}Y_{TT}^{-1}Y_{TL})^{-1} \\ K = Z_{LL}(Y_{LT}Y_{TT}^{-1}Y_{TG} - Y_{LG}) \end{cases} \quad (2)$$

式中， $Z_{LL}$ 为负荷母线之间的阻抗。对于负荷母线  $i$ ，其各个参数计算如下。

$$V_i = E_{eq,i} - (Z_{ii} + Z_{cp,i})I_i = E_{eq,i} - Z_{eq,i}I_i \quad (3)$$

$$E_{eq,i} = [KV_G]_i = \sum_{g \in G} K_{ig}V_g \quad (4)$$

$$Z_{cp,i} = \sum_{j \in L, j \neq i} Z_{ij} \frac{I_j}{I_i} = \sum_{j \in L, j \neq i} Z_{ij} \frac{S_j^* V_i^*}{S_i^* V_j^*} \quad (5)$$

式中： $Z_{ii}$ 表示负荷母线  $i$  的  $Z_{LL}$  的对角线元素； $Z_{ij}$ 表示负荷母线  $i$  与负荷母线  $j$  相对应的耦合阻抗； $Z_{cp,i}$ 表示负荷母线  $i$  的耦合阻抗，它代表从  $i$  节点看进去系统剩余部分等效阻抗； $K_{ig}$ 是  $K$  矩阵中对应负荷母线  $i$  与机压母线  $g$  的元素； $E_{eq,i}$ 和  $Z_{eq,i}$ 是负荷母线的戴维南等效电压和阻抗； $I_i$ 是负荷母线的电流； $G$ 和  $L$ 分别代表发电机组母线和负荷母线；\*表示该复数的共轭。

对于负荷按照一定比例增加时，母线  $i$  的负荷裕度  $\lambda_i$  可以通过式(6)计算得到。

$$\lambda_i = f(E_{eq,i}, X_{eq,i}, P_i, Q_i) = \frac{E_{eq,i}^2 (\sqrt{(R_{eq,i}^2 + X_{eq,i}^2)(P_i^2 + Q_i^2)} - R_{eq,i}P_i - X_{eq,i}Q_i)}{2(X_{eq,i}P_i - R_{eq,i}Q_i)^2} - 1 \quad (6)$$

式中： $\lambda_i$ 为负荷母线  $i$  的负荷裕度； $R_{eq,i}$ 和  $X_{eq,i}$ 分别为等效阻抗  $Z_{eq,i}$  的实部和虚部，可以通过式(7)和式(8)确定； $P_i$ 和  $Q_i$ 为母线  $i$  的发出有功和发出无功。

$$R_{eq,i} = R_{ii} + \sum_{\substack{k \in L \\ k \neq i}} \frac{V_i}{V_k S_i^2} [(R_{ik} \cos \theta_{ik} - X_{ik} \sin \theta_{ik})(P_i P_k + Q_i Q_k) - (R_{ik} \sin \theta_{ik} - X_{ik} \cos \theta_{ik})(Q_i P_k + P_i Q_k)] \quad (7)$$

$$X_{eq,i} = X_{ii} + \sum_{\substack{k \in L \\ k \neq i}} \frac{V_i}{V_k S_i^2} [(R_{ik} \cos \theta_{ik} + X_{ik} \sin \theta_{ik})(P_i P_k + Q_i Q_k) - (R_{ik} \sin \theta_{ik} - X_{ik} \cos \theta_{ik})(Q_i P_k - P_i Q_k)] \quad (8)$$

式中:  $S_i^2 = P_i^2 + Q_i^2$ ,  $R_{ii} + jX_{ii} = Z_{ii}$ ,  $R_{ik} + jX_{ik} = Z_{ik}$ ;  $\theta_{ik}$  为  $V_k$  和  $V_i$  之间的夹角;  $V_i$  为  $V_i$  的幅值。

系统的负荷裕度为电压崩溃点处对应的负荷总量, 可表示为

$$\lambda_{\text{sys}} = \min\{\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n\} \quad (9)$$

## 1.2 负荷裕度对风电注入功率灵敏度

1) 推导负荷节点对其自身电压量的自灵敏度  $A$  和  $B$ 。

在考虑负荷裕度灵敏度时要从其计算式出发进行计算。假设节点对其自身电压幅值自灵敏度为  $A$ , 则  $A$  计算式为

$$A = \frac{\partial \lambda_i}{\partial V_i} = \frac{\partial \lambda_i}{\partial R_{\text{eq},i}} \frac{\partial R_{\text{eq},i}}{\partial V_i} + \frac{\partial \lambda_i}{\partial X_{\text{eq},i}} \frac{\partial X_{\text{eq},i}}{\partial V_i} \quad (10)$$

式中:

$$\frac{\partial \lambda_i}{\partial R_{\text{eq},i}} = \frac{E_{\text{eq},i}^2 \left( \frac{R_{\text{eq},i} S_i}{Z_{\text{eq},i}} - P_i \right)}{2(X_{\text{eq},i} P_i - R_{\text{eq},i} Q_i)^2} + \frac{2Q_i(\lambda_i + 1)}{(X_{\text{eq},i} P_i - R_{\text{eq},i} Q_i)} \quad (11)$$

$$\frac{\partial \lambda_i}{\partial X_{\text{eq},i}} = \frac{E_{\text{eq},i}^2 \left( \frac{R_{\text{eq},i} S_i}{Z_{\text{eq},i}} - Q_i \right)}{2(X_{\text{eq},i} P_i - R_{\text{eq},i} Q_i)^2} + \frac{2P_i(\lambda_i + 1)}{(X_{\text{eq},i} P_i - R_{\text{eq},i} Q_i)} \quad (12)$$

$$\frac{\partial R_{\text{eq},i}}{\partial V_i} = \sum_{\substack{k \in L \\ k \neq i}} \frac{1}{V_k S_i^2} [(R_{ik} \cos \theta_{ik} - X_{ik} \sin \theta_{ik})(P_i P_k + Q_i Q_k) - (R_{ik} \sin \theta_{ik} + X_{ik} \cos \theta_{ik})(Q_i P_k - P_i Q_k)] \quad (13)$$

$$\frac{\partial X_{\text{eq},i}}{\partial V_i} = \sum_{\substack{k \in L \\ k \neq i}} \frac{1}{V_k S_i^2} [(R_{ik} \sin \theta_{ik} + X_{ik} \cos \theta_{ik})(P_i P_k + Q_i Q_k) + (R_{ik} \cos \theta_{ik} - X_{ik} \sin \theta_{ik})(Q_i P_k - P_i Q_k)] \quad (14)$$

$$B = \frac{\partial \lambda_i}{\partial \theta_i} = \frac{\partial \lambda_i}{\partial R_{\text{eq},i}} \frac{\partial R_{\text{eq},i}}{\partial \theta_i} + \frac{\partial \lambda_i}{\partial X_{\text{eq},i}} \frac{\partial X_{\text{eq},i}}{\partial \theta_i} \quad (15)$$

$$\frac{\partial R_{\text{eq},i}}{\partial \theta_i} = \sum_{\substack{k \in L \\ k \neq i}} \frac{V_i}{V_k S_i^2} [(R_{ik} \sin \theta_{ik} + X_{ik} \cos \theta_{ik})(P_i P_k + Q_i Q_k) + (R_{ik} \cos \theta_{ik} - X_{ik} \sin \theta_{ik})(Q_i P_k - P_i Q_k)] \quad (16)$$

$$\frac{\partial X_{\text{eq},i}}{\partial V_i} = \sum_{\substack{k \in L \\ k \neq i}} \frac{1}{V_k S_i^2} [(-R_{ik} \cos \theta_{ik} + X_{ik} \sin \theta_{ik})(P_i P_k + Q_i Q_k) + (R_{ik} \sin \theta_{ik} + X_{ik} \cos \theta_{ik})(Q_i P_k - P_i Q_k)] \quad (17)$$

式中字母所代表含义与上文一致,  $A$  代表负荷裕度与电压幅值的灵敏度,  $B$  代表负荷裕度与电压相角的灵敏度。通过上式可以计算出各个负荷节点

关于其自身电压量的灵敏度。

2) 推导负荷节点对其他负荷节点电压的互灵敏度。

与式(10)推导思想一致, 假设  $C$  和  $D$  分别表示负荷节点  $i$  与  $j$  的电压幅值灵敏度和电压相角灵敏度, 其可通过下式得到。

$$C = \frac{\partial \lambda_i}{\partial V_k} = \frac{\partial \lambda_i}{\partial R_{\text{eq},i}} \frac{\partial R_{\text{eq},i}}{\partial V_k} + \frac{\partial \lambda_i}{\partial X_{\text{eq},i}} \frac{\partial X_{\text{eq},i}}{\partial V_k} \quad (18)$$

$$\frac{\partial R_{\text{eq},i}}{\partial V_k} = \frac{V_i}{V_k S_i^2} [(R_{ik} \cos \theta_{ik} - X_{ik} \sin \theta_{ik})(P_i P_k + Q_i Q_k) - (R_{ik} \sin \theta_{ik} + X_{ik} \cos \theta_{ik})(Q_i P_k - P_i Q_k)] \quad (19)$$

$$\frac{\partial X_{\text{eq},i}}{\partial V_k} = -\frac{V_u}{V_k S_i^2} [(R_{ik} \sin \theta_{ik} + X_{ik} \cos \theta_{ik})(P_i P_k + Q_i Q_k) + (R_{ik} \cos \theta_{ik} - X_{ik} \sin \theta_{ik})(Q_i P_k - P_i Q_k)] \quad (20)$$

$$D = \frac{\partial \lambda_i}{\partial \theta_j} = \frac{\partial \lambda_i}{\partial R_{\text{eq},i}} \frac{\partial R_{\text{eq},i}}{\partial \theta_j} + \frac{\partial \lambda_i}{\partial X_{\text{eq},i}} \frac{\partial X_{\text{eq},i}}{\partial \theta_j} \quad (21)$$

$$\frac{\partial R_{\text{eq},i}}{\partial \theta_k} = \frac{V_u}{V_k S_i^2} [(-R_{ik} \sin \theta_{ik} - X_{ik} \cos \theta_{ik})(P_i P_k + Q_i Q_k) - (R_{ik} \cos \theta_{ik} - X_{ik} \sin \theta_{ik})(Q_i P_k - P_i Q_k)] \quad (22)$$

3) 推导负荷节点对发电机节点电压量的互灵敏度  $E$ 、 $F$ 。

$$E = \frac{\partial \lambda_i}{\partial E_{\text{eq},i}^2} \frac{\partial E_{\text{eq},i}^2}{\partial V_g} = \frac{\lambda_i + 1}{E_{\text{eq},i}^2} \frac{\partial E_{\text{eq},i}^2}{\partial V_g} \quad (23)$$

$$\frac{\partial E_{\text{eq},i}^2}{\partial V_g} = 2E_{\text{re},i} (K_{\text{re},ig} \cos \delta_g - K_{\text{im},ig} \sin \delta_g) + 2E_{\text{im},i} (K_{\text{re},ig} \sin \delta_g + K_{\text{im},ig} \cos \delta_g) \quad (24)$$

$$F = \frac{\partial \lambda_i}{\partial E_{\text{eq},i}^2} \frac{\partial E_{\text{eq},i}^2}{\partial \theta_g} = \frac{\lambda_i + 1}{E_{\text{eq},i}^2} \frac{\partial E_{\text{eq},i}^2}{\partial \theta_g} \quad (25)$$

$$\frac{\partial E_{\text{eq},i}^2}{\partial \theta_g} = 2E_{\text{re},i} V_g (-K_{\text{re},ig} \sin \delta_g - K_{\text{im},ig} \cos \delta_g) + 2E_{\text{im},i} (K_{\text{re},ig} \cos \delta_g - K_{\text{im},ig} \sin \delta_g) \quad (26)$$

计算完成灵敏度系数之后, 则负荷裕度关于节点电压量的灵敏度可以表示为

$$\Delta \lambda_i = A \Delta V_i + B \Delta \theta_i + C \Delta V_j + D \Delta \theta_j + E \Delta U_g + F \Delta \theta_g \quad (27)$$

## 2 负荷裕度概率分布

采用 Weibull 分布来描述风速概率, 其概率密

度函数模型为

$$f(v) = \left(\frac{k}{c}\right) \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} \exp\left[-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right] \quad (28)$$

式中:  $v$  代表风速, 单位是 m/s;  $k$  代表风电 Weibull 方法形状参数;  $c$  代表风电 Weibull 方法尺度参数, 用 m/s 表示。

式(28)对应的概率分布函数为

$$F(V) = P(v \leq V) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{V}{c}\right)^k\right] \quad (29)$$

首先计算风电节点注入功率的  $n$  阶矩, 该计算可以通过式(30)进行计算, 计算到 8 阶<sup>[23-26]</sup>。

$$a_{Fi,n} = \int_{0-P_{FE,i}}^{P_{FR,i}-P_{FE,i}} x^n f_i(x) dx \quad (30)$$

式中:  $P_{FR,i}$  表示风电注入功率额定值;  $P_{FE,i}$  为风电注入功率期望值。

则其  $n$  阶半不变量  $k_{Fi,n}$  计算式为

$$k_{Fi,n} = a_{Fi,n} - \sum_{m=1}^{n-1} C_{n-1}^{m-1} k_{Fi,m} a_{Fi,n-m} \quad (31)$$

进一步地, 基于所推导的负荷裕度灵敏度矩阵, 求解负荷裕度的各阶半不变量  $K_{L,n}$ 。

$$K_{L,n} = S_1^n k_{F1,n} + S_2^n k_{F2,n} + \dots + S_m^n k_{Fm,n} \quad (32)$$

式中,  $S_i$  表示负荷节点关于  $i$  灵敏度系数。

进一步地, 根据计算所得  $K_{L,n}$  计算负荷裕度各阶矩, 采用 8 阶中心矩 Gram-Charlier 展开<sup>[27]</sup>。首先要把负荷裕度指标标准化, 如式(33)所示。

$$\Delta \bar{\lambda}_i = \frac{\Delta \lambda_i - \mu}{\sigma} \quad (33)$$

式中:  $\mu = K_{L,1}$  为期望值;  $\sigma = \sqrt{K_{L,2}}$  为标准差。可以通过 Gram-Charlier 展开, 则有

$$f_\lambda(x) = \sum_{i=0}^k \frac{C_i}{i!} \varphi^{(i)}(x) \quad (34)$$

式中:  $f_\lambda(x)$  服从标准正态分布;  $\varphi^{(i)}(x)$  表示  $\varphi(x)$  的  $i$  阶导数; 系数  $c$  通过中心矩计算得到。

从而获得负荷裕度指标的概率密度函数为

$$f(x) = \frac{1}{\sigma} f_\lambda\left(\frac{x - \lambda_i - \mu}{\sigma}\right) \quad (35)$$

### 3 计算流程

根据上文所述的计算方法编写 Matlab 算法程序进行算例分析, 算法步骤如下:

1) 利用式(6)获取负荷裕度, 并且通过式(10)—式(27)计算负荷裕度对各节点电压幅值、相角的灵敏度系数。

2) 接入风电之后, 计算式(28)中风速参数  $k$  以

及  $c$ 。然后根据式(34)与式(35)计算风电节点的  $k_{Fi,n}$ 。

3) 计算系统雅可比矩阵, 并且求出雅可比逆矩阵后与灵敏度系数相乘得到负荷裕度关于节点注入功率的灵敏度矩阵。

4) 利用式(32)求得负荷裕度的  $k_{Fi,n}$ , 并且通过 Gram-Charlier 方法, 进一步获得负荷裕度概率密度函数。

## 4 算例分析

### 4.1 系统负荷裕度分析

基于 IEEE30 节点测试系统对所提方法进行评价。在本节中, 首先引入了 1 台风力发电机于 26 号节点, 利用该计算结果与引入 5 台风力发电机接入 3 个不同节点的计算结果进行对比分析。5 台风力发电机分别接入 14、16、26 节点, 共接入风机 5 台, 其中 14 节点与 16 节点接入 2 台风机, 26 节点 1 台风机, 系统图如图 1 所示。首先分析风机接入对电力系统负荷裕度的影响。

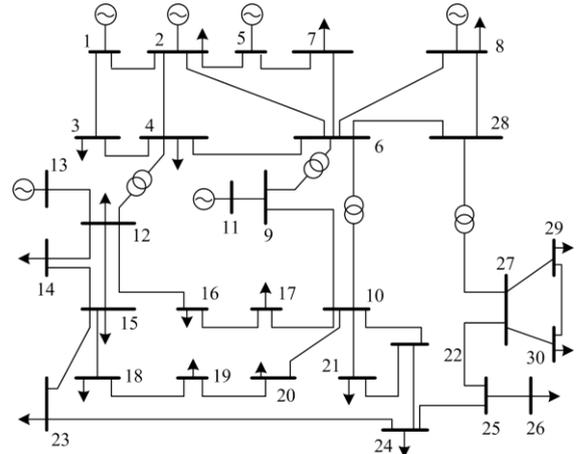


图 1 IEEE30 节点标准算例系统图

Fig. 1 Structure of IEEE30 bus standard example system

由式(35)求解负荷裕度指标, 如表 1 所示。

从表 1 中数据可知, 节点 3、4、7 负荷裕度计算值很高, 稳定性良好。由系统图可知, 节点 3、4、7 均临近发电厂, 虽然流过功率很大但其负荷裕度依旧很大。30 号负荷节点的负荷裕度最小, 为 1.695 0, 则此时选择 1.695 0 作为该系统的负荷裕度。由系统图可知, 30 节点与 29 节点相邻, 这两个节点为同一环形电网的两个不同的负荷节点, 30 输出有功较多, 则其负荷裕度较 29 小很多。其次, 接入 5 台风机之后, 电力系统负荷裕度与 26 号节点接入 1 台风机有较小的改变, 但不明显, 原因在于加入风机数量较小, 对电网静态电压稳定性产生影响不明显, 如果风机大规模投入使用则会产生明显影响。

表 1 负荷节点负荷裕度计算值

Table 1 Nodal load margin calculation results

负荷节点编号	1 台风机负荷裕度	5 台风机负荷裕度
	指标计算值	指标计算值
3	18.427 8	18.555 7
4	15.699 0	15.812 0
7	12.445 8	12.473 0
10	3.575 7	3.591 5
12	6.276 3	6.336 7
14	3.935 5	4.037 7
15	3.528 9	3.557 3
16	4.028 5	4.096 3
17	3.344 5	3.370 2
18	2.746 3	2.761 2
19	2.552 6	2.564 1
20	2.714 0	2.725 9
21	2.849 3	2.859 1
23	2.772 5	2.786 7
24	2.400 4	2.407 8
26	2.028 2	2.030 4
29	2.076 8	2.078 5
30	1.695 0	1.696 2

#### 4.2 风速预测值修正算法的实现

在本节中, 将分析负荷裕度灵敏度。表 2 为所得负荷裕度灵敏度结果。

表 2 负荷裕度灵敏度计算结果

Table 2 Calculation results of sensitivity of load margin

负荷节点编号	对 14 节点灵敏度	对 16 节点灵敏度	对 26 节点灵敏度
3	0.006 7	0.222 8	0.003 8
4	0.024 0	0.081 8	0.025 2
7	0.013 9	0.022 0	0.012 0
10	0.008 0	0.015 4	0.004 3
12	0.012 6	0.011 0	0.005 8
14	0.001 6	0.006 2	0.001 9
15	0.009 8	0.012 0	0.005 8
16	0.079 3	0.014 6	0.000 8
17	0.006 0	0.012 1	0.003 7
18	0.002 5	0.148 3	0.001 6
19	0.006 0	0.012 7	0.003 1
20	0.000 9	0.031 9	0.001 0
21	0.007 7	0.009 7	0.004 1
23	0.000 1	0.009 1	0.001 8
24	0.003 5	0.005 3	0.002 3
26	0.006 7	0.018 2	0.037 4
29	0.001 0	0.005 5	0.033 2
30	0.003 4	0.002 3	0.003 2

表 2 列出了各个负荷节点关于各风电节点的有功灵敏度, 由表(2)可知, 关于 14 号节点灵敏度最高的是 16 节点, 为 0.079 3, 关于 16 号节点注入功率灵敏度最高的是 3 节点, 为 0.222 8, 关于 26 号节点注入功率灵敏度最高的是 26 节点, 为 0.037 4。从上述数据可知, 风电节点的注入功率对系统其他节点的影响并不是简单地对其附近节点影响最明显、灵敏度最高。负荷裕度关于风电节点注入功率灵敏度不仅受其系统结构影响, 而且受其运行方式等因素的影响。

#### 4.3 静态电压概率稳定分析

在上文中分析了各个节点的电力系统负荷裕度值以及负荷裕度灵敏度的值, 下面将利用半不变量求解获得的各个节点负荷裕度概率密度函数以及累计概率分布进行分析。

对于 IEEE30 测试系统, 共有 18 个负荷节点, 每个节点又都有其负荷裕度概率密度函数以及概率分布函数, 本节将选取其中一些代表性的节点进行讨论分析。

在计算负荷裕度指标时选用 8 阶 Gram-Charlier 方法。首先将最小值点对应的概率密度函数与概率分布函数进行分析。分别选取蒙特卡洛法和 Gram-Charlier 方法对负荷裕度进行计算, 得到的概率密度等于其偏差的概率密度和不考虑不确定性的稳态值之和。图 2 为两种算法下 30 节点, 即负荷裕度最小节点偏差的概率密度函数。

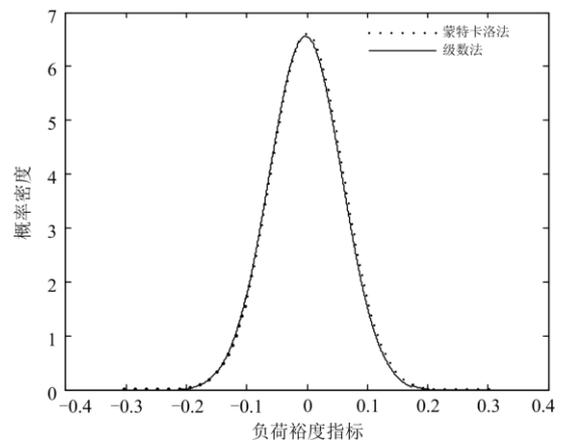


图 2 30 节点负荷裕度偏差概率密度分布对比图

Fig. 2 Comparison of probability density function of load margin deviation of Bus 30

分析图 2 可得, 该曲线与正态分布较为接近, 且两种算法的曲线基本重合, 其中, 最大计算误差为 0.152%, 平均计算误差为 0.093%, 其结果有效证明了所提出的 Gram-Charlier 级数法的准确性。

为验证本文所提方法具有较高计算效率, 本节进一步统计了采用本文所提方法和蒙特卡罗法计算 30 节点负荷裕度偏差的概率密度的计算时间, 其结果如表 3 所示。

表 3 30 节点负荷裕度偏差概率密度的计算时间对比  
Table 3 Comparison of computational time of probability density of load margin deviation of Bus 30

计算方法	本文所提方法	蒙特卡罗法
计算时间/s	2.532	641.239

表 3 对比给出了采用本文所提方法和蒙特卡罗法计算 30 节点偏差的概率密度的计算时间(计算平台 CPU Intel Core i5-4210H, 主频 2.9 GHz, 内存 8 GB)。表 3 结果表明, 相较于蒙特卡罗法, 本文所提方法在实现节点负荷裕度偏差的概率密度高精度计算的前提下, 具有更高的计算效率。

进一步地, 24、26、29、30 节点的负荷裕度概率密度函数见图 3, 其计算耗时如表 4 所示。

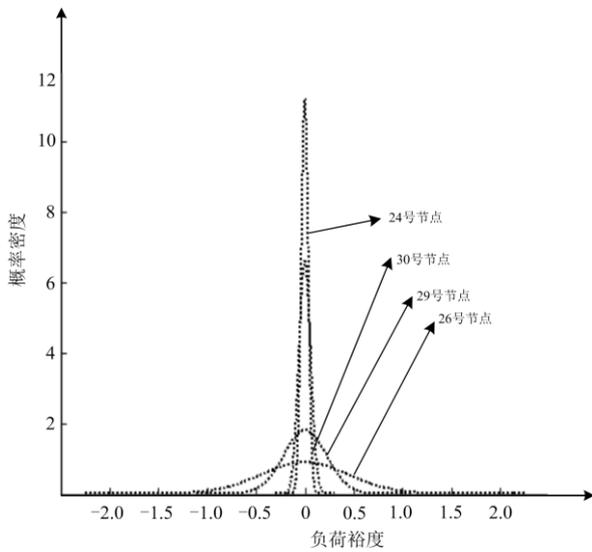


图 3 24、26、29、30 节点负荷裕度偏差的概率密度函数  
Fig. 3 Probability density function of load margin deviation of Bus 24, 26, 29, 30

表 4 24、26、29、30 节点负荷裕度偏差概率密度计算耗时  
Table 4 Computational time of probability density of load margin deviation of Bus 24, 26, 29, 30

负荷节点编号	24	26	29	30
计算耗时/s	2.354	2.765	2.436	2.532

由表 4 计算结果分析可知, 本文所提方法可实现节点负荷裕度偏差的概率密度高效计算。

不同节点的概率密度函数不同, 负荷裕度偏差的期望和波动范围不同, 其中 26 号节点负荷裕度变

化范围最大。图 4 则给出了 30 节点概率分布结果, 以上结果验证了本文方法的合理性与有效性。

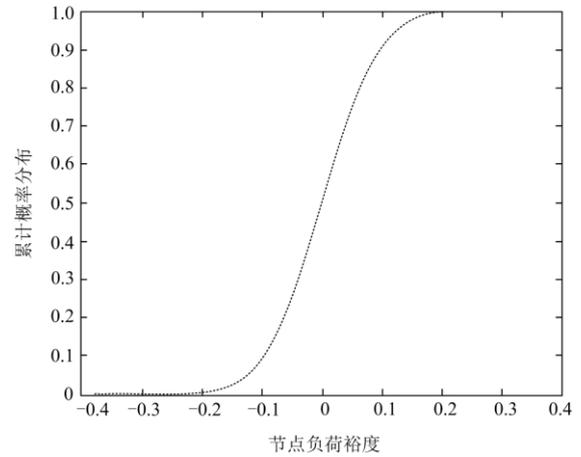


图 4 30 节点负荷裕度偏差累积概率分布图  
Fig. 4 Cumulative probability function of load margin deviation of Bus 30

## 5 结论

本文以广域测量系统的负荷裕度求解方法为依据, 在考虑风电随机出力情况下, 提出了一种基于负荷裕度指标的静态电压稳定性概率计算方法。通过本文方法与蒙特卡洛对比分析可知, 在保证负荷裕度偏差的概率密度分布合理的情况下, 具有较高的计算效率。对比分析不同节点的概率密度函数计算耗时, 本文方法可高效计算节点负荷裕度偏差的概率密度, 且根据其累计概率分布可评估其静态电压稳定的失稳风险。通过仿真结果, 验证了本文方法的有效性, 适用于大规模风电并网后系统静态电压稳定性的分析评估。

## 参考文献

- [1] 朱泽安, 周修宁, 王旭, 等. 基于稳暂态联合仿真模拟的区域多可再生能源系统评估决策[J]. 电工技术学报, 2020, 35(13): 2780-2791.  
ZHU Ze'an, ZHOU Xiuning, WANG Xu, et al. Evaluation and decision-making of regional multi-renewable energy system based on steady-transient integrated simulation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(13): 2780-2791.
- [2] HU Bo, WANG He, YAO Sen. Optimal economic operation of isolated community microgrid incorporating temperature controlling devices[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(1): 70-80. DOI: 10.1186/s41601-017-0037-1.
- [3] 刘故帅, 肖异瑶, 贺禹强, 等. 考虑新能源类型的电力

- 系统多目标并网优化方法[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(10): 31-37.
- LIU Gushuai, XIAO Yiyao, HE Yuqiang, et al. Multi-objective optimal method considering types of grid connected new energy of electric power system[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(10): 31-37.
- [4] LI X, YAO L, HUI D. Optimal control and management of a large-scale battery energy storage system to mitigate fluctuation and intermittence of renewable generations[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2016, 4(4): 593-603.
- [5] 李东波, 李凤婷, 宋学强, 等. 促进新能源消纳的自备电厂参与替代交易风险管理研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(11): 30-36.
- LI Dongbo, LI Fengting, SONG Xueqiang, et al. Research on risk management of participatory alternative power plants to promote new energy consumption[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(11): 30-36.
- [6] 张虹, 侯宁, 葛得初, 等. 供需互动分布式发电系统收益-风险组合优化建模及其可靠性分析[J]. 电工技术学报, 2020, 35(3): 623-635.
- ZHANG Hong, HOU Ning, GE Dechu, et al. Modeling and reliability analysis of benefit-risk portfolio optimization for supply and demand interactive distributed generation system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(3): 623-635.
- [7] YUAN Haoyu, JIANG Tao, JIA Hongjie, et al. Real-time wide-area loading margin sensitivity (WALMS) in power systems[C] // 2015 IEEE Power & Energy Society General Meeting, July 26-30, 2015, Denver, CO, USA.
- [8] 陈汝昌, 陈飞, 张帆, 等. 新能源电网中微电源并网控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(12): 55-60.
- CHEN Ruchang, CHEN Fei, ZHANG Fan, et al. Control strategies for grid-connected microsource in new energy power systems[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(12): 55-60.
- [9] 方印, 刁培玉, 申庆斌, 等. 计及“源-网-荷”成本效益的可再生能源渗透率影响量化分析[J]. 智慧电力, 2019, 47(5): 43-50, 58.
- FANG Yin, XI Peiyu, SHEN Qingbin, et al. Quantitative analysis of the impact of renewable energy penetration on the cost-effectiveness of “supply-grid-load”[J]. Smart Power, 2019, 47(5): 43-50, 58.
- [10] 周冬, 陈阜东, 邹红波, 等. 基于改进烟花算法的可再生能源动态经济调度分析[J]. 智慧电力, 2019, 47(5): 59-64, 77.
- ZHOU Dong, CHEN Fudong, ZOU Hongbo, et al. Dynamic economic scheduling for renewable energy based on improve fireworks algorithm[J]. Smart Power, 2019, 47(5): 59-64, 77.
- [11] JIANG Tao, BAI Lingquan, JIA Hongjie, et al. Identification of voltage stability critical injection region in bulk power systems based on the relative gain of voltage coupling[J]. IET Generation, Transmission, and Distribution, 2016, 10(7): 1495-1503.
- [12] 王君亮, 李君. 风光并网对河南电网系统稳态影响[J]. 电网与清洁能源, 2019, 35(9): 81-87.
- WANG Junliang, LI Jun. Effect of integration of wind and photovoltaic power on henan power grid steady-state[J]. Power System and Clean Energy, 2019, 35(9): 81-87.
- [13] 潘旭东, 黄豫, 唐金锐, 等. 新能源发电发展的影响因素分析及前景展望[J]. 智慧电力, 2019, 47(11): 41-47.
- PAN Xudong, HUANG Yu, TANG Jinrui, et al. Influencing factors and prospects for development of renewable energy power generation[J]. Smart Power, 2019, 47(11): 41-47.
- [14] 王超, 常海军, 摆世彬, 等. 高比例新能源与多直流场景下连锁故障防控策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(7): 49-57.
- WANG Chao, CHANG Haijun, BAI Shibin, et al. Study on the prevention and control strategy of cascading failure of bulk power system with multi-HVDC and high proportion of renewable energy[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(7): 49-57.
- [15] 鲍海波, 韦化. 考虑风电的电压稳定概率评估的随机响应面法[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(13): 77-85.
- BAO Haibo, WEI Hua. A stochastic response surface method for probabilistic evaluation of the voltage stability considering wind power[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(13): 77-85.
- [16] CHEN H, FANG X, ZHANG R, et al. Available transfer capability evaluation in a deregulated electricity market considering correlated wind power[J]. IET Generation, Transmission, and Distribution, 2018, 12(1): 53-61.
- [17] 朱涛, 梁铃, 宋振涛, 等. 基于MAS和Petri-net技术的新能源电网协调控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(12): 1-7.
- ZHU Tao, LIANG Ling, SONG Zhentao, et al. MAS based coordination control strategies for micro-grid by using Petri-net[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(12): 1-7.
- [18] VERBIC G, CANIZARES C. Probabilistic optimal power flow in electricity markets based on a two-point estimate method[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2006,

- 21(4): 1883-1893.
- [19] LI Xue, LI Yuzeng, ZHANG Shaohua. Analysis of probabilistic optimal power flow taking account of the variation of load power[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2008, 23(3): 992-999.
- [20] 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.  
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.
- [21] 叶圣永, 王晓茹, 周曙, 等. 基于马尔可夫链蒙特卡罗方法的电力系统暂态稳定概率评估[J]. 电工技术学报, 2012, 27(6): 168-174.  
YE Shengyong, WANG Xiaoru, ZHOU Shu, et al. Power system probabilistic transient stability assessment based on Markov chain Monte Carlo method[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(6): 168-174.
- [22] 朱晨曦, 张焰, 严正, 等. 采用改进马尔可夫链蒙特卡罗法的风电功率序列建模[J]. 电工技术学报, 2020, 35(3): 577-589.  
ZHU Chenxi, ZHANG Yan, YAN Zheng, et al. A wind power time series modeling method based on the improved Markov Chain Monte Carlo method[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(3): 577-589.
- [23] 李中成, 张步涵, 段瑶, 等. 含大规模风电场的电力系统概率可用输电能力快速计算[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(4): 505-513.  
LI Zhongcheng, ZHANG Buhuan, DUAN Yao, et al. Fast calculation of probabilistic available transfer capability in power systems including large-scale wind farms[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(4): 505-513.
- [24] 叶林, 张亚丽, 李强, 等. 采用分段离散化和高斯混合模型的多场景概率潮流计算[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(12): 131-137.  
YE Lin, ZHANG Yali, LI Qiang, et al. Calculation of multi-scenario probabilistic power flow based on piecewise and Gaussian mixture model[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(12): 131-137.
- [25] 罗钢, 石东源, 蔡德福, 等. 计及相关性的含风电场电力系统概率可用输电能力快速计算[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(7): 1024-1032.  
LUO Gang, SHI Dongyuan, CAI Defu, et al. Fast calculation of probabilistic available transfer capability considering correlation in wind power integrated systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(7): 1024-1032.
- [26] MORALES J M, PEREZ-RUIZ J. Point estimate schemes to solve the probabilistic power flow[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2007, 22(4): 1594-1601.
- [27] 艾小猛, 文劲宇, 吴桐, 等. 基于点估计和 Gram-Charlier 展开的含风电电力系统概率潮流实用算法[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(16): 16-22.  
AI Xiaomeng, WEN Jinyu, WU Tong, et al. A practical algorithm based on point estimate method and Gram-Charlier expansion for probabilistic load flow calculation of power systems incorporating wind power[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(16): 16-22.
- [28] 毛晓明, 叶嘉俊. 主元分析结合 Cornish-Fisher 展开的概率潮流三点估计法[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(6): 66-72.  
MAO Xiaoming, YE Jiajun. A three-point estimate method for probabilistic load flow computation based on principal component analysis and Cornish-Fisher series[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(6): 66-72.
- [29] 袁昊宇, 李方兴, 姜涛, 等. 基于耦合单端口网络理论的广域负荷裕度灵敏度及其在电压稳定控制中的应用[J]. 南方电网技术, 2017, 11(10): 74-86.  
YUAN Haoyu, LI Fangxing, JIANG Tao, et al. Coupled single-port circuit concept based wide-area load margin sensitivity and its application on voltage stability control[J]. Southern Power System Technology, 2017, 11(10): 74-86.

收稿日期: 2020-04-21; 修回日期: 2020-08-29

作者简介:

那广宇(1981—), 男, 高级工程师, 研究方向为电力系统安全稳定分析; E-mail: nanguangyu@163.com

魏俊红(1977—), 女, 高级工程师, 研究方向为发电厂涉网保护与控制; E-mail: 15800110022@163.com

王亮(1983—), 男, 高级工程师, 研究方向为电网运行检修及方式分析. E-mail: syauwl@163.com

(编辑 许威)