**引用格式:**黄兴华,张功林,陈飞雄,等.计及分布式电源仿射模型的配电网高斯迭代潮流算法[J].电力科学与技术学报,2025,40(2):89-99. **Citation:** HUANG Xinghua,ZHANG Gonglin,CHEN Feixiong, et al.Gaussian iterative power flow algorithm for distribution network considering affine model of distributed generation[J]. Journal of Electric Power Science and Technology,2025,40(2):89-99.

# 计及分布式电源仿射模型的配电网高斯 迭代潮流算法

黄兴华1,张功林2,陈飞雄3,吴 涵1,范元亮1,陈石川2,吴鸿斌3

(1.国网福建省电力有限公司电力科学研究院,福建福州 350007;2.国网福建省电力有限公司,福建福州 350003;3.福州大学电气工程与自动化学院,福建福州 350108)

摘 要:仿射潮流计算是电力系统不确定性分析的有效手段。在分布式电源接入比例不断提高的背景下,现有高 斯迭代仿射潮流算法难以适用于含有不同控制策略分布式电源的配电网。针对该问题,提出一种计及分布式电源 仿射模型的配电网高斯迭代潮流算法。首先,基于仿射算术建立电网不确定性潮流模型,构建仿射潮流的高斯迭 代模型;其次,建立不同控制策略下的分布式电源仿射模型,通过共用噪声元处理、无功修正和电压区间边界修正, 提出计及分布式电源仿射模型的配电网高斯迭代潮流算法;最后,基于IEEE-33系统的算例对该算法进行了仿真 分析,验证其有效性与可靠性。研究结果表明,所提方法能实现计及不同分布式电源控制策略的配电网仿射潮流 计算,并具有较低的保守性和较高的计算效率。

**关 键 词:**分布式电源;配电网;不确定性;潮流计算;仿射算术;高斯迭代 **DOI**:10.19781/j.issn.1673-9140.2025.02.010 **中图分类号:**TM744 **文章编号:**1673-9140(2025)02-0089-11

# Gaussian iterative power flow algorithm for distribution network considering affine model of distributed generation

HUANG Xinghua<sup>1</sup>, ZHANG Gonglin<sup>2</sup>, CHEN Feixiong<sup>3</sup>, WU Han<sup>1</sup>, FAN Yuanliang<sup>1</sup>, CHEN Shichuan<sup>2</sup>, WU Hongbin<sup>3</sup>

(1. Electric Power Research Institute, State Grid Fujian Electric Power Co., Ltd., Fuzhou 350007, China; 2. State Grid Fujian Electric Power Co., Ltd., Fuzhou 350003, China; 3. College of Electrical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China)

**Abstract:** Affine power flow calculation is an effective method for uncertainty analysis in power systems. With the increasing integration of distributed generation (DG), the existing Gaussian iterative affine power flow algorithm faces challenges in dealing with distribution networks that incorporate DG controlled by different strategies. To address these problems, a Gaussian iterative power flow algorithm for a distribution network that integrates an affine model for DG is proposed. Firstly, an uncertainty power flow model is established based on affine arithmetic, and a Gaussian iterative model for the affine power flow model is constructed. Secondly, the affine models for DG under different control strategies are established. By using common noise processing, reactive power correction, and voltage boundary correction, a Gauss iterative power flow algorithm for DG is proposed. Finally, through simulations on the IEEE 33-bus system, the effectiveness and reliability of the proposed algorithm are validated. The results indicate that the proposed method is capable of calculating the affine power flow in distribution networks with different DG control strategies, offering low conservatism and high computational efficiency.

Key words: distributed energy resource; distribution network; uncertainty; power flow calculation; affine arithmetic; Gaussian iteration

收稿日期:2023-12-05;修回日期:2024-06-21

基金项目:国家自然科学基金(52107080);国网福建省电力有限公司科技项目(52130021N002) 通信作者:吴鸿斌(2000一),男,硕士研究生,主要从事综合能源系统不确定性理论与方法等方面的研究;E-mail: 269613970@qq.com 随着风电、光伏等分布式电源(distributed generation, DG)接入比例的不断上升,其波动、间歇的出 力特征使得配电网的不确定性水平进一步提高,对 电网安全的稳定运行带来了新挑战<sup>[1-3]</sup>。潮流计算 是电力网络分析的重要基础,不确定性潮流计算能 获取不确定性因素影响下的状态量分布范围,为电 网分析和决策提供更有效的支撑<sup>[4-6]</sup>。

目前,对不确定性潮流计算方法的研究主要可 分为区间潮流<sup>[7]</sup>、概率潮流<sup>[8]</sup>和模糊潮流<sup>[9-10]</sup>这3类。 其中,区间潮流方法仅需获取不确定量的上、下边 界,就可获取状态量分布范围。该方法相比概率潮 流和模糊潮流方法,具有所需信息少、易于实现等 优势<sup>[11-12]</sup>。然而,区间潮流方法存在区间过度扩张 的问题,该问题可能导致区间潮流结果过于保守, 降低了方法的实际工程意义<sup>[13]</sup>。作为区间潮流的 改进方法,仿射潮流利用噪声元辨识和跟踪各不确 定性因素影响,能考虑不确定变量之间的关联,可 有效改善区间过度扩张的问题<sup>[14-16]</sup>。因此,其在电 力系统不确定性建模与稳态分析中得到了广泛的 研究与应用<sup>[17-22]</sup>。

文献[23]利用仿射算术改进 Krawczyk-Moore 区间迭代算法,缩小了潮流解的区间范围。文献 [24-26]提出了基于前推回代法的仿射潮流算法,但 该前推回代法难以直接应用于环路网络,其适用范 围较小。文献[27]提出了一种仿射潮流求解优化 方法,该方法通过压缩噪声元取值范围求取潮流区 间布,但其复杂的优化模型导致计算耗时颇长。文 献[28]提出了基于牛顿一拉夫逊法的仿射潮流算 法,但该算法需要对仿射数矩阵求逆近似处理,其 计算复杂度高且存在一定的计算误差。相比这些 算法,高斯迭代潮流算法具有原理简单、易于编程 等优点[29]。该算法对于配电网潮流计算具有良好 的适用性和较高的计算效率,故有学者提出了一种 基于高斯迭代的仿射潮流算法,并验证了该算法在 计算精度上的优势<sup>[30]</sup>。现有高斯迭代仿射潮流算 法在PQ节点电压方程的基础上进行迭代计算。但 在DG 接入比例不断提高的背景下,节点类型等效 与并网DG的控制策略密切相关,不同控制策略DG 的不确定性注入功率特性不同,无法将DG并网节 点直接等效为传统的PQ节点。因此,基于PQ节点 电压方程的迭代算法已难以适用。这为高斯迭代 仿射潮流算法在实际中的应用带来了困难。

针对DG并网下的潮流计算问题,文献[31]将

DG在潮流计算中的模型分为PQ恒定型、PV恒定 型和Q=f(V)型这3类,并利用前推回代法的电压 迭代结果对DG的无功功率进行反复校正,实现了 对含不同类型DG的潮流计算;文献[32]针对PV恒 定型DG提出了一种内外双层循环计算方法,其先 在内层循环中将DG并网节点等效为PQ节点进行 计算,再在外层循环中基于正序分量计算DG无功 校正量,获得了较好的结果;文献[33]建立了鲁棒 下垂控制节点的功率修正方程,并将其整理至牛 顿一拉夫逊迭代方程中进行统一求解;文献[34]建 立了一种适用于环网和下垂节点的统一功率修正 矩阵,在算法的前推回代计算过程中对节点功率进 行统一修正。这些研究所提模型与方法均为确定 性计算范畴,仍难以适用于不确定性环境下的配电 网分析。

综上所述,在不确定性潮流计算中,如何在保 持高斯迭代潮流算法优势的同时,根据不同控制策 略的DG特性建立其不确定性仿射模型,提高高斯 仿射潮流算法对含有不同类型DG的配电网的适用 性,仍有待进一步研究。

为此,本文提出一种计及DG仿射模型的配电 网高斯迭代潮流算法。考虑负荷功率和DG出力的 不确定性,先建立节点功率仿射模型和电压仿射模 型;再进一步基于节点导纳矩阵构造仿射潮流高斯 迭代模型;然后,在此基础上,分析不同DG控制策 略下的DG仿射建模原理,并分别采取共用噪声元 处理、无功修正和电压区间边界修正方法,提出计 及DG仿射模型的高斯迭代潮流算法;最后,通过基 于IEEE-33系统的算例分析,验证了所提方法可应 用于含不同控制策略DG的配电网仿射潮流计算, 该算法具有保守性低的优势,且在系统不确定性水 平提高时,仍然能够保持较高的计算效率。

# 1 仿射潮流高斯迭代方法

仿射潮流原理与高斯迭代过程,是仿射潮流高 斯迭代算法的基础。

#### 1.1 仿射算术

在仿射计算中,仿射数 *x* 为不确定量,其可展开 为中心值与若干噪声元项的组合,即

$$\hat{x} = x_0 + \sum_{l=1}^{L} x_l \boldsymbol{\varepsilon}_l \tag{1}$$

式中, $x_0$ 为中心值; $\epsilon_l$ 为第l个噪声元,表示第l个不确定性因素,其被定义为[-1,1]上的数; $x_l$ 为噪声

元系数,表示噪声元 ε<sub>i</sub>对不确定量的影响程度;L为 噪声元个数。

通过引入噪声元,仿射计算能考虑不同的不确 定变量之间的相关性,避免在长计算链中发生无限 制的区间扩张,相比区间计算,其能获得更紧凑的区 间结果。以具体运算为例,对于区间数形式的不确 定变量 $x \in [-3,3]$ ,根据区间运算 $x \in [-6,6]$ 。但 该计算的准确结果应为0,而由于区间算术仅依靠 区间边界进行运算,无法在运算过程中识别不确定 变量之间的相关性,故其造成了区间扩张的结果。 而若采用仿射计算建模,即 $\hat{x}=0+3\epsilon, \epsilon \in [-1,1]$ ,则按照仿射计算有 $\hat{x}-\hat{x}=(0+3\epsilon)-(0+3\epsilon)=0$ , 可见仿射计算能够利用噪声元 $\epsilon$ 实现区间变量相关 性的识别,从而改善区间运算精度。

仿射计算存在完备性与保守性的问题。若计 算所得仿射解域完全涵盖真实解域,则仿射解具有 完备性;若计算所得仿射解域覆盖且超出真实解 域,则仿射解具有保守性。理想的仿射解应在满足 完备性的同时,尽可能降低其保守性<sup>[13]</sup>。

#### 1.2 仿射功率与仿射电压模型

考虑负荷功率和DG出力的不确定性,对节点 注入功率进行仿射建模,即

$$\begin{cases} \hat{S}_{i} = \hat{P}_{i} + j\hat{Q}_{i} \\ \hat{P}_{i} = P_{i,0} + \sum_{m=1}^{M} P_{im} \varepsilon_{m}^{p} \\ \hat{Q}_{i} = Q_{i,0} + \sum_{m=1}^{M} Q_{im} \varepsilon_{m}^{q} \end{cases}$$
(2)

式中, $\hat{S}_i$ 为节点i的仿射注入功率; $\hat{P}_i$ 和 $\hat{Q}_i$ 分别为节 点i的仿射注入有功和无功功率; $P_{i,0}$ 为注入有功中 心值; $P_{im}$ 和 $\epsilon_m^n$ 分别为第m个有功噪声元和对应的噪 声元系数; $Q_{i,0}$ 为注入无功中心值; $Q_{im}$ 和 $\epsilon_m^n$ 分别为 第m个无功噪声元和对应的噪声元系数;M为不确 定性因素个数。

类似地,节点电压的仿射模型为

$$\hat{V}_i = V_{i,0} + \sum_{m=1}^M V_{im} \boldsymbol{\varepsilon}_m \tag{3}$$

式中, $\hat{V}_i$ 为节点*i*的仿射电压; $V_{i,0}$ 为电压中心值; $\epsilon_m$ 为第*m*个噪声元; $V_{im}$ 为对应的节点*i*的噪声元系数。

基于仿射功率和仿射电压模型,可根据电力功 率平衡方程进行仿射潮流计算。电力系统各节点 的仿射功率平衡方程的一般形式为

$$\sum_{k=1}^{N_{i}} Y_{ik} \hat{V}_{k} = \frac{\hat{S}_{i}^{*}}{\hat{V}_{i}^{*}}$$
(4)

式中, $N_e$ 为节点数; $Y_{ik}$ 为节点导纳矩阵的第i行、第k列的元素; $\hat{S}_i$ 为节点i的仿射注入功率的共轭; $\hat{V}_i$ 为节点i的仿射电压的共轭。

## 1.3 仿射潮流高斯迭代计算

根据式(4),可将仿射功率平衡方程组表示为 分块矩阵形式,即

$$\begin{bmatrix} Y & Y_{in} \\ Y_{ni} & Y_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{V} \\ \hat{V}_{n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\hat{S}^{*}}{\hat{V}^{*}} \\ \frac{\hat{S}^{*}_{n}}{\hat{V}^{*}_{n}} \end{bmatrix}$$
(5)

式中,下标 n 为平衡节点的表示符号;  $Y_{nn}$  为平衡节 点 n 的自导纳;  $Y_{in}$ 和  $Y_{ni}$ 为节点导纳矩阵中,平衡节 点 n 与其他节点之间构成的分块矩阵,这二者互为 转置矩阵; Y为节点导纳矩阵去除  $Y_{nn}$ 、 $Y_{in}$ 和  $Y_{ni}$ 后 剩余的分块矩阵;  $\hat{V}_n$ 和  $\hat{V}_n^*$ 分别为平衡节点 n 的仿 射电压及其共轭;  $\hat{V}$ 和  $\hat{V}^*$ 为其余节点的仿射电压及 其共轭矩阵;  $\hat{S}_n^*$ 为平衡节点 n 的仿射注入功率的共 轭:  $\hat{S}^*$  为其余节点的仿射注入功率的共轭矩阵。

根据式(5),则有

$$\hat{V} = Y^{-1} \left[ \frac{\hat{S}^{*}}{\hat{V}^{*}} - Y_{in} \hat{V}_{n} \right]$$
(6)

进一步地,将式(6)具体展开,可得仿射潮流高 斯迭代式,即

$$\begin{bmatrix} \hat{V}_{1}^{(k)} \ \hat{V}_{2}^{(k)} \ \cdots \ \hat{V}_{n-1}^{(k)} \end{bmatrix}^{1} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & \cdots & Y_{1(n-1)} \\ Y_{21} & Y_{22} & \cdots & Y_{2(n-1)} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Y_{(n-1)1} & Y_{(n-1)2} & \cdots & Y_{(n-1)(n-1)} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \left(\frac{\hat{S}_{1}}{\hat{V}_{1}^{(k-1)}}\right)^{*} - Y_{1n}\hat{V}_{n} \\ \left(\frac{\hat{S}_{2}}{\hat{V}_{2}^{(k-1)}}\right)^{*} - Y_{2n}\hat{V}_{n} \\ \vdots \\ \left(\frac{\hat{S}_{n-1}}{\hat{V}_{n-1}^{(k-1)}}\right)^{*} - Y_{(n-1)n}\hat{V}_{n} \end{bmatrix}$$

$$(7)$$

式中, $\hat{V}_{i}^{(k)}$ 表示第*i*个节点仿射电压的第*k*次迭代结果; $\hat{V}_{i}^{(k-1)}$ 表示第*i*个节点仿射电压的第*k*-1次迭代结果; $Y_{ii}$ 表示矩阵 Y的第*i*行、第*j*列的元素。

据此,基于仿射电压初值  $\hat{V}^{(0)}$ ,可根据式(7) 进行高斯迭代计算。将各节点前、后两次迭代计 算得到的仿射电压分别转化为复区间值<sup>[24]</sup>,当这 二者的区间偏差小于阈值 $\delta$ 时,则判断该次迭代 收敛,即

$$\begin{cases} \max\left(\left|\overline{V}_{i,e}^{(k)} - \overline{V}_{i,e}^{(k-1)}\right|\right) < \delta \\ \max\left(\left|\underline{V}_{i,e}^{(k)} - \underline{V}_{i,e}^{(k-1)}\right|\right) < \delta \\ \max\left(\left|\overline{V}_{i,f}^{(k)} - \overline{V}_{i,f}^{(k-1)}\right|\right) < \delta \\ \max\left(\left|\underline{V}_{i,f}^{(k)} - \underline{V}_{i,f}^{(k-1)}\right|\right) < \delta \end{cases}$$

$$(8)$$

式中, $\delta$ 为收敛阈值; max(·)表示取最大值;  $\overline{V}_{i,e}^{(k)}$ 、  $\underline{V}_{i,e}^{(k)}$ 、 $\overline{V}_{i,f}^{(k)}$ 、 $\underline{V}_{i,f}^{(k)}$ 分别为第 k次迭代得到的节点 i 的电 压实部上界、实部下界、虚部上界、虚部下界。

根据计算得到的电压仿射值,可将其转化为电 压幅值和相角区间<sup>[30]</sup>,获得潮流分布区间。

# 2 计及 DG 仿射模型的高斯迭代潮流 算法

在传统的高斯迭代仿射潮流算法中,各节点均 直接按照PQ节点形式进行计算。这种计算方式难 以应用于含不同控制策略DG的配电网。一方面, 现有DG潮流模型属于确定性范畴,故仍需结合不 同控制策略DG的潮流特性,建立不确定性潮流环 境下的DG仿射模型;另一方面,仿射潮流计算过程 中的迭代变量为仿射数,这将导致传统修正方法难 以适用,仍需探寻一种行之有效的计及DG仿射模 型的高斯迭代潮流计算算法。因此,先分析与建立 不同控制策略下的DG仿射模型;再提出适用于不 同DG控制策略的配电网高斯迭代潮流算法。

#### 2.1 不同 DG 控制策略的仿射模型及计算原理

在潮流计算中,并网DG的控制策略主要可分为定功率因数控制、定电压控制以及Q=f(V)型控制这3类<sup>[31]</sup>。

# 2.1.1 定功率因数控制策略

在不确定性因素影响下,定功率因数型DG的 注入有功功率与无功功率仍保持着比例关系。因此,可通过DG有功功率和无功功率共用一个噪声 元来进行仿射建模,即

$$\begin{cases} \hat{Q}_{i}^{\mathrm{DG}} = \hat{P}_{i}^{\mathrm{DG}} \tan\varphi \\ \hat{P}_{i}^{\mathrm{DG}} = P_{i,0}^{\mathrm{DG}} + P_{i}^{\mathrm{DG}} \varepsilon_{i}^{\mathrm{DG}} \\ \hat{Q}_{i}^{\mathrm{DG}} = Q_{i,0}^{\mathrm{DG}} + Q_{i}^{\mathrm{DG}} \varepsilon_{i}^{\mathrm{DG}} \end{cases}$$
(9)

式中, $\hat{P}_{i}^{\text{DG}}$ 和 $\hat{Q}_{i}^{\text{DG}}$ 分别为节点*i*所接DG的仿射有功 和无功功率; $P_{i,0}^{\text{DG}}$ 和 $Q_{i,0}^{\text{DG}}$ 分别为DG有功和无功功率 中心值; $\varepsilon_{i}^{\text{DG}}$ 为共用噪声元; $P_{i}^{\text{DG}}$ 和 $Q_{i}^{\text{DG}}$ 分别为有功和 无功噪声元系数; $\varphi$ 为功率因数角。 将式(9)中的仿射变量展开,可得

$$\begin{cases} Q_{i,0}^{\text{DG}} = P_{i,0}^{\text{DG}} \tan\varphi \\ Q_{i}^{\text{DG}} = P_{i}^{\text{DG}} \tan\varphi \end{cases}$$
(10)

由式(10)可知,DG的仿射有功和无功功率这 二者的中心值和噪声元系数均与tanφ存在比例关 系。故若能保证ε<sup>pG</sup>取到取值范围内的任意值,则 无功功率点值与有功功率点值之间始终存在着与 tanφ的比例关系。因此,对于定功率因数型DG,可 先在仿射功率建模中,对其按式(9)进行共用噪声元 处理,再可根据仿射高斯迭代式(7)进行迭代计算。

2.1.2 定电压控制策略

对于定电压型 DG,其节点电压幅值 V<sub>ref</sub>会事先 给定,在潮流计算中可将该节点视为 PV 节点。因此,运行在定电压控制策略的 DG 仿射模型为

$$\begin{cases} \hat{P}_{i}^{\mathrm{DG}} = P_{i,0}^{\mathrm{DG}} + P_{i}^{\mathrm{DG}} \boldsymbol{\varepsilon}_{i}^{\mathrm{DG}} \\ \left| \hat{V}_{i} \right| = V_{i,\mathrm{ref}} \end{cases}$$
(11)

式中, V<sub>i,ref</sub>为DG所在节点 i 的给定电压幅值。

由于高斯迭代算法难以适用于含有 PV 节点的 系统,故须对其进行额外处理。配电网系统的节点 电压幅值主要与无功功率有关,可根据 PV 节点电 压偏差对其无功功率进行修正。

设电压控制型 DG 间节点阻抗矩阵为Z,电流 增量矢量为ΔI<sub>DG</sub>,电压增量矢量为ΔV<sub>DG</sub>,则有

$$Z\Delta I_{\rm DG} = \Delta V_{\rm DG} \tag{12}$$

DG复功率的变化量可近似表示为

$$\Delta S_{\rm DG} = \Delta P_{\rm DG} + j\Delta Q_{\rm DG} = V_{\rm DG} \odot \Delta I_{\rm DG}^* \approx |V_{\rm DG}| \odot \Delta I_{\rm DG}^*$$
(13)

式中, $\Delta S_{DG}$ 、 $\Delta P_{DG}$ 和  $\Delta Q_{DG}$ 分别为 DG 复功率、有功 功率和无功功率的变化量; $V_{DG}$ 为 DG 节点电压幅 值向量;⊙为矩阵点乘运算符号。

联立式(12)与(13),则有

 $(R + jX) [(\Delta P_{DG} - j\Delta Q_{DG}) \oslash |V_{DG}|] = \Delta V_{DG}$ (14) 式中, R 为节点电阻矩阵, X 为节点电抗矩阵, 满足 Z=R+jX; ②为矩阵点除运算符号。

由于在对DG进行无功修正时,DG输出有功不 应受其影响,故令式(14)中 $\Delta P_{DG} \equiv 0$ ,展开可得实 部方程,即

$$X(\Delta \boldsymbol{Q}_{\rm DG} \bigotimes | \boldsymbol{V}_{\rm DG} |) \approx |\Delta \boldsymbol{V}_{\rm DG}| \qquad (15)$$

至此,可得无功修正量,即

$$\Delta \boldsymbol{Q}_{\rm DG} = \left( \boldsymbol{X}^{-1} | \Delta \boldsymbol{V}_{\rm DG} | \right) \bigodot | \boldsymbol{V}_{\rm DG} | = \left( \boldsymbol{X}^{-1} \left( \boldsymbol{V}_{\rm ref} - | \boldsymbol{V}_{\rm DG} | \right) \right) \oslash | \boldsymbol{V}_{\rm DG} | \qquad (16)$$

式中, V<sub>ref</sub>为DG所在节点给定电压幅值向量。

93

综合该无功修正方法,对于定电压型DG,可基 于仿射电压迭代结果的电压中心值向量 V<sup>(k)</sup>,根据 式(16)计算 DG 确定性无功修正量 Δ**Q**<sub>DG</sub>,以此修正 DG 仿射功率中心值,并以更新后的仿射功率进行 下一轮高斯迭代计算。需要说明的是,由于仿射潮 流计算是不确定性仿射运算,该修正方法仅完成了 对中心值的修正,后续仍需对区间边界进行进一步 修正,具体将在文2.2中阐述。

2.1.3 Q=f(V)型控制策略

*Q*=*f*(*V*)型DG根据电压幅值确定DG输出无功,故其仿射模型为

$$\begin{cases} \hat{P}_{i}^{\mathrm{DG}} = P_{i,0}^{\mathrm{DG}} + P_{i}^{\mathrm{DG}} \boldsymbol{\varepsilon}_{i}^{\mathrm{DG}} \\ \hat{Q}_{i}^{\mathrm{DG}} = f\left(\hat{V}_{i}^{\mathrm{DG}}\right) \end{cases}$$
(17)

式中, $\hat{V}_i^{DG}$ 为节点*i*所接DG的仿射电压。

无功功率与电压的函数关系通常采用一阶分 段函数表示,即

$$Q_{i}^{\mathrm{DG}} = \begin{cases} R_{1}(V_{i}^{\mathrm{DG}} - V_{\min 2}), & V_{\min 1} \leqslant V < V_{\min 2} \\ 0, & V_{\min 2} \leqslant V \leqslant V_{\max 1} \\ -R_{2}(V_{i}^{\mathrm{DG}} - V_{\max 1}), & V_{\max 1} < V \leqslant V_{\max 2} \end{cases}$$
(18)

式中, $R_1$ 和 $R_2$ 均为下垂系数; $V_i^{DG}$ 为节点i所接DG的电压; $V_{min1}$ 、 $V_{max2}$ 、 $V_{max2}$ 均为一阶分段函数的电压分段点。

对于Q(V)型的DG,同样可基于每次仿射电压 迭代结果的电压中心值向量V<sup>(k)</sup>,根据式(18)更新 DG 仿射功率中心值,并以更新后的仿射功率进行 下一轮高斯迭代计算。

综上所述,对于定功率因数型DG,可在仿射功 率建模中对其进行共用噪声元处理;而对于定电压 和 *Q*=*f*(*V*)型DG,需要在高斯迭代过程中,根据仿 射电压中心值对DG输出无功中心值进行修正,最 终获得满足收敛条件的仿射电压结果。

# 2.2 计及 DG 仿射模型的配电网高斯迭代仿射潮 流计算流程

对于定电压控制和 Q=f(V)型控制的 DG,由 于其输出无功均根据仿射电压中心值进行修正,故 该算法仅能保证所得仿射电压中心值的准确性,而 电压上、下区间边界仍需进一步修正。

对于仿射电压的高斯迭代收敛结果  $\hat{V}^{(k)}$ ,可将 其转化电压幅值区间  $\tilde{V}$ 和相角区间 $\tilde{\theta}$ ,即

$$\begin{cases} \tilde{V} = [\underline{V}, \bar{V}] \\ \tilde{\theta} = [\underline{\theta}, \bar{\theta}] \end{cases}$$
(19)

式中, $\bar{V}$ 和<u>V</u>分别为电压幅值区间的上、下边界; $\bar{\theta}$ 和 $\theta$ 分别为电压相角区间的上、下边界。

同时,根据  $\hat{V}^{(k)}$ 的仿射中心值计算雅可比矩阵 J,其应满足

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = J \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \end{bmatrix}$$
(20)

式中, $\Delta P$ 和 $\Delta Q$ 分别为节点有功功率和无功功率的 变化量向量; $\Delta \theta$ 和 $\Delta V$ 分别为节点电压相角和电压 幅值变化量向量。

进一步地,对雅可比矩阵J求逆,可得

$$\begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \end{bmatrix} = J^{-1} \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{P\theta} & S_{Q\theta} \\ S_{PV} & S_{QV} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} \quad (21)$$

式中,*S*<sub>P0</sub>、*S*<sub>Q0</sub>、*S*<sub>PV</sub>和*S*<sub>QV</sub>分别为电压相角-有功灵敏 度矩阵、电压相角-无功灵敏度矩阵、电压幅值-有 功灵敏度矩阵和电压幅值-无功灵敏度矩阵。

对于定电压和 Q = f(V)型 DG,令 $S_{QV,DG}$ 为 $S_{QV}$ 中 DG 对应列向量构成的子矩阵, $S_{Q\ell,DG}$ 为 $S_{Q\ell}$ 中 DG 对应列向量构成的子矩阵,则 $S_{QV,DG}$ 和 $S_{Q\ell,DG}$ 即为各 节点电压幅值和相角对 DG 无功增量向量  $\Delta Q_{DG}$ 的 灵敏度矩阵,其应满足

$$\begin{bmatrix} \Delta V \\ \Delta \theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{\rm QV, DG} \\ S_{\rm Q\delta, DG} \end{bmatrix} \Delta Q_{\rm DG}$$
(22)

以电压区间上界为例说明,对电压区间下界的 修正同理。设修正次数K=1,原高斯迭代的电压区 间结果 $\bar{V}$ 和 $\bar{\theta}$ 即为待修正的电压区间边界初值 $\bar{V}^{(0)}$ 和 $\bar{\theta}^{(0)}$ 。根据 $\bar{V}^{(0)}$ 和 $\bar{\theta}^{(0)}$ ,按式(16)或式(18)计算,得 到无功修正量 $\Delta Q_{\rm DG}$ ,该电压区间上界修正式为

$$\begin{bmatrix} \bar{V}^{(K)} \\ \bar{\theta}^{(K)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{V}^{(K-1)} \\ \bar{\theta}^{(K-1)} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta V \\ \Delta \theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{V}^{(K-1)} \\ \bar{\theta}^{(K-1)} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} S_{QV,DG} \\ S_{Q\delta,DG} \end{bmatrix} \Delta Q_{DG}$$
(23)

式中, $\bar{V}^{(K)}$ 和 $\bar{\theta}^{(K)}$ 分别为第K次修正的电压幅值上界和电压相角上界。

若 Δ $Q_{DG}$ 满足收敛精度  $\eta$ ,则停止迭代,并输出 修正后的电压区间上界;否则,根据修正得到的电 压区间边界结果,更新 DG 无功修正量 Δ $Q_{DG}$ ,令 $K \leftarrow$ K+1,并进行下一次修正。

结合上述分析,本文所提的计及DG仿射模型的 配电网高斯迭代潮流算法(Gaussian iteration power flow algorithm for distribution network considering DG affine model, GAA法)整体上可划分为高斯迭 代计算和电压区间边界修正2阶段:在高斯迭代计 算中,含DG无功功率的修正计算步骤;高斯迭代收 敛后,根据仿射电压迭代收敛结果进行电压区间边 界修正。该算法的具体计算流程如图1所示。







# 3 算例分析

#### 3.1 算例说明

本文基于扩展的 IEEE-33系统,对该算法的有效性进行验证分析。计算硬件平台为 AMD Ryzen 7735H处理器、32 GB内存的个人计算机,软件平台为 MATLAB 2022b。

扩展的 IEEE-33系统共接入 3个 DG,其拓扑结构如图 2 所示。为更全面地验证所提算法对于不同控制策略 DG 接入下的算法性能,设置如表1 所示的 3 种 DG 控制方案,计算与分析不同 DG 控制方案下系统的潮流分布。方案1中,DG 均为定功率因数控制,仅需进行仿射功率建模处理;方案2中,DG 均为定电压控制,需进行无功功率和电压区间边界修正;方案 3 则同时含有 3 种不同 DG 控制策略。

设置 DG-13、DG-25 和 DG-33 的额定有功分 别为0.4、0.7 和 0.5 MW。在定功率因数控制中,设 DG-13、DG-25 和 DG-33 的功率因数分别为0.97、 0.96 和 0.96;在定电压控制中,设置 DG-13、DG-25 和DG-33的电压幅值分别为0.970、0.975和0.970 p.u., 定电压型 DG 所在节点等效为 PV 节点;在 Q=f(V) 型控制中,设置电压分段点 V<sub>min1</sub>、V<sub>min2</sub>、V<sub>max1</sub>和 V<sub>max2</sub> 分别为0.95、0.97、1.00和1.02 p.u.。

仿射功率的中心值取原系统配置中的注入功率数据,该数据和其余系统拓扑参数可由 Matpower7.0<sup>[35]</sup>得到;噪声元系数通过功率波动范围确 定,如第2节点的负荷有功在0.1 MW的±10%波动,则噪声元系数取为0.01。功率波动范围将在具体算例中给出。



Table 1 Control schemes for DG

控制方案		DG控制策略	
	DG-13	DG-25	DG-33
1	定功率因数	定功率因数	定功率因数
2	定电压	定电压	定电压
3	定功率因数	定电压	Q=f(V)控制

### 3.2 完备性与保守性分析

为验证所提算法的有效性,以蒙特卡洛法 (Monte Carlo method, MC)作为参照,设MC法在 不确定性功率区间范围内随机采样10000次,重复 进行确定性潮流计算,可近似认为MC法所得区间 结果为真实解域。同时,将所提算法与区间潮流高 斯迭代算法(Gaussian iteration interval power flow algorithm,GIA法)进行对比。GIA法基于本文所提 DG模型,采用区间算术进行不确定性潮流高斯迭 代计算。

设置 DG 功率和负荷功率均在额定功率的 ±20%内波动,计算不同控制方案下的系统潮流分 布。对于控制方案1,不同不确定性潮流算法计算 所得电压区间结果分别如图3、4所示。





Figure 3 Voltage amplitude range under control scheme 1





Figure 4 Voltage phase angle range results under control scheme 1

从图 3、4 中可以看出,GIA 法和所提 GAA 法计算所得电压区间结果均能完全包含 MC 法的区间结 果,即能够涵盖可能出现的所有潮流情况,表明这 二者均充分满足完备性。相比 GIA 法,所提算法的 区间结果更接近 MC 法的,具有更好的保守性。

对于控制方案2,不同算法计算所得电压区间 结果分别如图5、6所示。



图5 控制方案2的电压幅值区间





Figure 6 Voltage phase angle range results under control scheme 2

从图 5、6 中可以看出,在控制方案 2下,所提算 法同样充分满足完备性,且定电压控制型 DG 所在 节点的电压幅值符合给定值,说明所提算法通过无 功修正和电压区间边界修正的两步修正,能够实现 计及 DG 定电压控制的配电网仿射潮流计算,弥补 了传统高斯迭代法仅适用于含有 PQ 节点的网络的 不足;同时所提算法适用于环路网络,能避免出现 前推回代法需要重复进行环路修正的问题。

对于控制方案3,不同算法计算所得电压区间 结果分别如图7、8所示。



图7 控制方案3的电压幅值区间

Voltage amplitude range under control scheme 3

Figure 7





从图 7、8 中可以看出,当系统同时含有不同类型 DG 时,所提算法计算所得电压边界仍符合 MC 法的电压区间分布规律,且其充分涵盖 MC 法的计算结果,验证了所提计及不同 DG 控制策略的仿射 潮流算法的有效性。

从图 3~8中还可以看出,在这 3种控制方案下, 控制方案 2下的电压幅值区间范围更窄。其原因在 于,相比其他控制方案,控制方案 2中的 DG 均采取 定电压控制,对 DG 接入节点的电压具有较强的调

图6 控制方案2的电压相角区间

压能力,且其能进一步降低由功率波动引起的各节 点电压幅值波动范围。从图 3~8 中还可以看出,在 不同控制方案下,所提 GAA 法的保守性均低于 GIA 法的。为进一步量化分析所提算的保守性优 势,定义平均保守度<sup>1[36]</sup>:

$$\begin{cases} \nu = \left(\sum_{i=1}^{K} g(X_i) + \sum_{i=1}^{K} h(X_i)\right) / (2K) \\ g(X_i) = \left[ (\bar{X}_{i,\max} - X_{i,\max}) / X_{i,\max} \right] \times 100\% \end{cases}$$
(24)  
$$h(X_i) = \left[ (X_{i,\min} - \bar{X}_{i,\min}) / X_{i,\min} \right] \times 100\% \end{cases}$$

式中, $\bar{X}_{i, max}$ 和 $\bar{X}_{i, min}$ 分别为不确定性潮流算法计算所 得状态量的区间上、下界; $X_{i, max}$ 和 $X_{i, min}$ 分别为MC 法计算所得状态量的区间上、下界;K为不确定性状 态量数量。保守度 $\nu$ 越小,算法结果越贴近真实结 果,算法保守性越低。

以电压幅值为例,考虑DG和负荷功率的不同 波动范围,计算不同控制方案下GAA法和GIA法 的平均电压幅值保守度,结果如图9所示。



图9 不同控制方案的平均电压幅值保守度 Figure 9 Conservatism of average voltage amplitude under

different control schemes

从图9中可看出,在不同控制方案和不同功率 波动范围下,所提GAA法的电压幅值保守度均小 于GIA法的。综合而言,所提GAA法的保守性仅 为GIA的72.3%,这是因为仿射算术能计及不确定 性变量之间的相关性,有效改善区间运算保守性过 大的问题。此外,随着系统不确定性水平提高,即 当源荷功率波动范围增大时,控制方案2的电压幅 值保守度扩增程度较小,其仍能保持较低水平的保 守性;在控制方案1下,虽然电压幅值保守度将随着 系统不确定性水平提高而有所增大,但平均每提高 10%不确定性水平,电压幅值保守度仅提高0.20%, 其仍具有良好的保守性。

#### 3.3 计算效率分析

基于不同功率波动水平,测试不同控制方案下 各不确定性潮流算法的计算时间,结果见表2。同时,测试不同场景下所提GAA法的高斯迭代收敛 次数,结果如图10所示。

表2 不同控制方案下的计算时间

Table 2         Computation time under different control scher	nes
--	-----

控制方案	不确定性	功率波动范围/%		
	潮流算法	$\pm 10\%$	$\pm 20\%$	$\pm 30\%$
1	MC	16.939	16.882	17.126
	GIA	0.132	0.148	0.152
	GAA	0.148	0.156	0.167
2	МС	22.104	21.747	22.581
	GIA	0.202	0.236	0.213
	GAA	0.210	0.248	0.228
3	MC	20.834	20.398	19.735
	GIA	0.202	0.211	0.201
	GAA	0.215	0.212	0.207



图 10 不同控制方案下的所提算法高斯迭代次数 Figure 10 Gaussian iteration counts of proposed algorithm under different control schemes

由表2可知,由于MC法需要反复计算确定性 潮流,故其计算效率最低;由于区间潮流仅根据区 间边界进行区间运算,故GIA法的计算效率略高于 GAA法的。但如前文所述,区间方法存在保守性 较大的问题,可能降低计算所得潮流解的工程意 义;而所提算法在保持低保守性的同时,计算耗时 与GIA法的较为接近,该算法同样具有较高的计算 效率。

同时,表2的结果还表明,所提GAA法的计 算耗时并不随不确定性水平上升而显著提高。结 合图10可知,GAA法的高斯迭代次数几乎不随不 确定性水平提高而增大,其能保持较为稳定的收 敛速度。此外,电压区间边界修正时亦无须反复 计算雅可比矩阵,计算量远小于高斯迭代的,对整 体计算效率影响较小。故当系统不确定性水平提 高时,所提GAA法仍然能够保持较高的计算 效率。

# 4 结语

本文提出一种计及分布式电源仿射模型的配 电网高斯迭代潮流算法,分析和验证了所提算法的 有效性,主要结论如下:

1) 建立了不同控制策略下的 DG 仿射模型, 进一步构造计及 DG 仿射模型的高斯迭代潮流模型,通过共用噪声元、无功功率与电压区间边界修 正,有效实现计及不同 DG 控制策略的配电网仿 射潮流计算,拓展了高斯迭代仿射潮流的适用 范围。

2)所提算法的计算结果涵盖可能出现的所有 不确定性潮流情况,在充分满足完备性的同时,其 相比区间潮流方法具有更低的保守性。所提算法 的高斯迭代收敛次数几乎不受系统不确定性水平 影响。当不确定性水平提高时,所提算法仍然能够 保持较高的计算效率。

#### 参考文献:

 [1] 黎博,陈民铀,钟海旺,等.高比例可再生能源新型电力 系统长期规划综述[J].中国电机工程学报,2023,43(2): 555-581.

LI Bo, CHEN Minyou, ZHONG Haiwang, et al. A review of long-term planning of new power systems with large share of renewable energy[J]. Proceedings of the CSEE, 2023,43(2):555-581.

[2] 吴应双,冯祥勇,王寅,等.一种考虑新能源电站出力不确定性的采样鲁棒无功优化方法[J].电力科学与技术 学报,2023,38(2):84-95.

WU Yingshuang, FENG Xiangyong, WANG Yin, et al. A sample robust reactive power optimization approach considering the power output uncertainty of renewable energy stations[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2023, 38(2):84-95.

- [3] 廖小兵,刘开培,乐健,等.电力系统区间潮流计算方法 综述[J].中国电机工程学报,2019,39(2):447-458+642.
   LIAO Xiaobing, LIU Kaipei, LE Jian, et al. Review on interval power flow calculation methods in power system
   [J].Proceedings of the CSEE,2019,39(2):447-458+642.
- [4] 王绪利,潘东,施天成,等.新型电力系统背景下源网荷储一体化项目友好性评估方法[J].电网与清洁能源,

2024,40(1):72-82.

WANG Xuli, PAN Dong, SHI Tiancheng, et al. A friendliness evaluation method for the source-network-load-storage integration project under the background of new power system[J]. Power System and Clean Energy, 2024,40(1):72-82.

- [5] 李可雨,王峰,蔡德胜,等.新能源发电协同参与配电网 无功优化控制技术[J].供用电,2023,40(4):15-22.
  LI Keyu, WANG Feng, CAI Desheng, et al. Optimized reactive power control technology in distribution network considering new energy resource aggregation[J].
  Distribution & Utilization,2023,40(4):15-22.
- [6] 徐永海,薛超凡,陶顺,等.电力系统谐波潮流计算方法 综述[J].电测与仪表,2023,60(12):1-10.
  XU Yonghai, XUE Chaofan, TAO Shun, et al. Review on harmonic power flow calculation method for power system[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2023,60(12):1-10.
- [7] 费迎阳,江岳文,洪启腾.交直流混合配电网改进区间潮流算法[J].电网技术,2021,45(7):2683-2692.
   FEI Yingyang,JIANG Yuewen,HONG Qiteng.Improved interval power flow algorithm for AC/DC hybrid distribution network[J].Power System Technology,2021, 45(7):2683-2692.
- [8] 曹瑞琳,邢洁,李征.基于改进级数展开的含风电电力系统概率潮流计算方法[J].电网技术,2022,46(9):3447-3455.

CAO Ruilin, XING Jie, LI Zheng. Improved series expansion based probabilistic load flow calculation for power system with wind power[J]. Power System Technology,2022,46(9):3447-3455.

[9] 张辰琪,朱成昊,李洋,等.基于随机模糊潮流的三相不 平衡配电网节能降损方法[J].电力科学与技术学报, 2022,37(6):212-218.

ZHANG Chenqi,ZHU Chenghao,LI Yang,et al.Research on energy saving and loss reduction method of threephase unbalanced power grid based on stochastic fuzzy power flow[J]. Journal of Electric Power Science and Technology,2022,37(6):212-218.

 [10] 潘骏,夏祥武,李梁,等.基于关联潮流感知与高斯混合模型的异常用电检测[J].电力建设,2023,44(11): 138-148.

PAN Jun, XIA Xiangwu, LI Liang, et al. Abnormal power consumption detection based on associative power flow sensing and Gaussian mixture model[J]. Electric Power Construction, 2023, 44(11):138-148.

[11] 胡泉,尚策,程浩忠,等.综合能源系统能流计算方法述 评与展望[J].电力系统自动化,2020,44(18):179-191.
HU Xiao,SHANG Ce,CHENG Haozhong, et al. Review and prospect of calculation method for energy flow in integrated energy system[J]. Automation of Electric Power Systems,2020,44(18):179-191.

[12] 杨鹏,李铁成,苏灿,等.适用于多并行线路功率平衡的
 电磁式潮流控制方法[J].高压电器,2024,60(12):
 170-179.

YANG Peng,LI Tiecheng,SU Can, et al. Electromagnetic power flow control method for power balance of multiple parallel lines[J]. High Voltage Apparatus, 2024, 60(12):170-179.

- [13] 黄耿业,邵振国,黄圆皓,等.仿射型区间潮流算法应用 与展望[J].电网技术,2021,45(7):2675-2682.
  HUANG Gengye, SHAO Zhenguo, HUANG Yuanhao, et al. Application and prospect of interval power flow algorithm based on affine arithmetic[J]. Power System Technology,2021,45(7):2675-2682.
- [14] VACCARO A, CANIZARES C A, VILLACCI D. An affine arithmetic-based methodology for reliable power flow analysis in the presence of data uncertainty[J].IEEE Transactions on Power Systems,2010,25(2):624-632.
- [15] 李壹民,邵振国,黄圆皓,等.电-热综合能源系统仿射型
   区间多能流算法[J].中国电机工程学报,2023,43(9): 3429-3443.

LI Yimin, SHAO Zhenguo, HUANG Yuanhao, et al. Interval multi-energy flow algorithm for integrated heat and electricity system based on affine arithmetic[J]. Proceedings of the CSEE,2023,43(9):3429-3443.

- [16] 徐艳春,阚锐涵,谢莎莎,等.基于改进三点估计的概率 谐波潮流计算[J].智慧电力,2023,51(6):1-7.
  XU Yanchun,KAN Ruihan,XIE Shasha,et al.Calculation of probabilistic harmonic power flow based on improved three-point estimation method[J].Smart Power, 2023, 51 (6):1-7.
- [17] 邵振国,刘懿萱,张嫣.基于实测数据的风电场风速-功 率特性仿射建模方法[J].电力自动化设备,2019,39(6): 96-101.

SHAO Zhenguo, LIU Yixuan, ZHANG Yan. Affine modelling method of wind speed-power characteristics in wind farm based on measured data[J]. Electric Power Automation Equipment,2019,39(6):96-101.

- [18] 张小莲,孙阿传,郝思鹏,等.风电场参与电网调频的多 机协同控制策略[J].发电技术,2024,45(3):448-457.
   ZHANG Xiaolian,SUN Achuan,HAO Sipeng,et al.Multimachine cooperative control strategy of wind farm participating in power grid frequency modulation[J].
   Power Generation Technology,2024,45(3):448-457.
- [19] 敖鑫,王淳.配电网区间线性三相潮流的非迭代仿射 求逆计算方法[J].电力系统自动化,2018,42(15):150-156.

AO Xin, WANG Chun. Non-iterative affine inverse algorithm for interval linear three-phase power flow calculation of distribution networks[J]. Automation of Electric Power Systems,2018,42(15):150-156.

[20] 穆怀天,廉洪亮,刘娟,等.基于数据物理融合驱动配电 网三相线性化潮流及线损分析应用[J].中国电力,2024, 57(10):46-56.

MU Huaitian, LIAN Hongliang, LIU Juan, et al. Application of three-phase linearized power flow and line loss analysis of distribution network driven by data and physics fusion[J]. Electric Power, 2024, 57(10): 46-56.

[21] 黄圆皓,邵振国,陈飞雄,等.计及新能源发电控制策略的超松弛迭代仿射谐波潮流算法[J].电网技术,2023,47 (11):4497-4514.

HUANG Yuanhao,SHAO Zhenguo,CHEN Feixiong,et al. Affine harmonic power flow algorithm based on successive over-relaxation iteration considering control strategies of renewable energy generation[J]. Power System Technology,2023,47(11):4497-4514.

- [22] 邵振国,王树洪.一种采用复仿射区间潮流的有源配电网多目标无功优化方法[J].中国电机工程学报,2017,37 (17):4956-4965+5215.
  SHAO Zhenguo, WANG Shuhong. Multi-objective reactive power optimization method of distribution network with DGs base on complex affine power flow algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(17): 4956-4965+5215.
  [23] 丁涛,崔翰韬,顾伟,等.基于区间和仿射运算的不确定
- [23] J 海,崔嘲铂,顾伟,寺.基于区间和仿别运身的不确定 潮流算法[J].电力系统自动化,2012,36(13):51-55+115. DING Tao, CUI Hantao, GU Wei, et al. An uncertainty power flow algorithm based on interval and affine arithmetic[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012,36(13):51-55+115.
- [24] 韩亮,王守相.含光伏风电的基于仿射算法的配电三相 潮流计算[J].电网技术,2013,37(12):3413-3418.
  HAN Liang, WANG Shouxiang. Affine algorithm based calculation of three-phase power flow in distribution network connected with PV generation and wind generation[J]. Power System Technology, 2013, 37(12): 3413-3418.
- [25] 王守相,韩亮.DG出力不确定性对配电网影响力分析 的复仿射数学方法[J].中国电机工程学报,2014,34(31): 5507-5515.

WANG Shouxiang, HAN Liang. Complex affine arithmetic based method for the analyses of DG's uncertainty influence on distribution network[J]. Proceedings of the CSEE,2014,34(31):5507-5515.

[26] 陈鹏伟,肖湘宁,Mesut BARAN.计及分布式电源无功 特性的弱环配电网复仿射潮流算法[J].电力系统自动 化,2019,43(7):59-66.

CHEN Pengwei, XIAO Xiangning, BARAN M. Complex

affine arithmetic based power flow algorithm for weakmesh distribution network considering reactive power characteristics of distributed generator[J]. Automation of Electric Power Systems,2019,43(7):59-66.

- [27] ZHANG C,CHEN H Y,NGAN H,et al. A mixed interval power flow analysis under rectangular and polar coordinate system[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2017,32(2):1422-1429.
- [28] 邵振国,汤炜坤,张嫣,等.基于海森矩阵的仿射谐波潮 流保守性优化[J].电力自动化设备,2021,41(1):172-179. SHAO Zhenguo, TANG Weikun, ZHANG Yan, et al. Conservation optimization of affine harmonic power flow based on Hessian matrix[J]. Electric Power Automation Equipment,2021,41(1):172-179.
- [29] 彭谦.电力系统稳态高斯算法的研究[D].北京:华北电力大学,2009.
   PENG Qian.Research on GAUSS calculation method of power system steady-state[D]. Beijing: North China Electric Power University,2009.
- [30] 王树洪,邵振国.考虑DG运行不确定性的复仿射Ybus 高斯迭代区间潮流算法[J].电力自动化设备,2017,37
  (3):38-44.
  WANG Shuhong, SHAO Zhenguo. Interval power-flow

algorithm based on complex affine Ybus-Gaussian iteration considering uncertainty of DG operation[J]. Electric Power Automation Equipment,2017,37(3):38-44.

- [31] 张立梅,唐巍.计及分布式电源的配电网前推回代潮流 计算[J].电工技术学报,2010,25(8):123-130.
  ZHANG Limei, TANG Wei. Back/forward sweep power flow calculation method of distribution networks with DGs[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010,25(8):123-130.
- [32] 李红伟,张安安.含PV型分布式电源的弱环配电网三

相潮流计算[J]. 中国电机工程学报,2012,32(4):128-135+8.

LI Hongwei, ZHANG An' an. Three-phase power flow solution for weakly meshed distribution system including PV type distributed generation[J]. Proceedings of the CSEE,2012,32(4):128-135+8.

[33] 肖凡,张昌华,段雪,等.逆变器潮流计算节点类型等效及鲁棒下垂节点的潮流计算[J].电力系统自动化,2018,42(10):75-81.

XIAO Fan, ZHANG Changhua, DUAN Xue, et al. Equivalence of inverter node type in power flow calculation and power flow calculation for robust droop control node[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018,42(10):75-81.

[34] 吴红斌,杨超,陈煜,等.基于电压源型换流器的多端直 流配电网潮流计算[J].电力系统自动化,2018,42(11): 79-85+93.

WU Hongbin, YANG Chao, CHEN Yu, et al. VSC based power flow calculation of multi-terminal DC distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(11):79-85+93.

- [35] ZIMMERMAN R D, MURILLO-SÁNCHEZ C E, THOMAS R J. MATPOWER: steady-state operations, planning, and analysis tools for power systems research and education[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2011,26(1):12-19.
- [36] 邵振国,黄耿业,张嫣,等.固定噪声元的预测-校正型 仿射潮流迭代算法[J].中国电机工程学报,2021,41(7): 2331-2341.

SHAO Zhenguo, HUANG Gengye, ZHANG Yan, et al. A predictor-corrector affine power flow iteration algorithm based on fixed noise element[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(7):2331-2341.