

考虑 DG 运行不确定性的复仿射 Ybus 高斯迭代 区间潮流算法

王树洪, 邵振国

(福州大学 电气工程与自动化学院, 福建 福州 350116)

摘要: 采用复仿射描述 DG 出力和状态变量的不确定性, 建立复仿射迭代形式的 Ybus 高斯区间潮流方程。提出将同类噪声元合并的处理方法, 减少迭代过程中增加的噪声元数量, 兼顾区间潮流计算的效率和精度。提出从复仿射计算电压幅值区间值和相角区间值的方法。IEEE 33 节点系统算例验证了所提方法的有效性和准确性。

关键词: 配电网; 分布式电源; 区间潮流; 复仿射; Ybus 高斯迭代; 噪声元; 潮流计算; 不确定性

中图分类号: TM 711

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2017.03.007

0 引言

分布式电源(DG)易受气象影响, 输出功率具有随机性和间歇性, 因而配电网潮流具有明显的不确定性特征。配电网规划和调度需要分析研究不确定性潮流算法, 当前主要提出了模糊数学法^[1-3]、概率潮流法^[4-9]及区间分析法^[10-13]。由于工程中难以获得不确定性参数的隶属函数或概率密度, 只能近似处理或人为设定, 导致计算结果出现较大偏差。相对而言, 获取不确定性参数的区间值较为简便、准确。因此采用区间数形式描述分布式电源的不确定性并计算有源配电网的区间潮流, 具有更好的工程应用价值。

基于区间数计算法则的区间潮流结果存在超宽度问题^[10-11], 降低了算法实用性。文献[14-16]因此将仿射数学运用到区间潮流计算中, 在一定程度上压缩了解的范围, 计算结果更加精确。然而文献[14]的迭代过程只是部分采用仿射, 没有完全发挥仿射的作用。文献[15-16]完全采用仿射进行迭代, 却只求出节点电压的实部区间和虚部区间, 没能得到节点电压的幅值区间和相角区间。

上述研究表明, 仿射比区间运算能得到更准确的结果, 但基于仿射迭代的区间潮流计算仍存在几个问题: 如果严格遵循仿射运算法则, 噪声元数量会不断增加, 降低潮流计算速度; 随着噪声元数目增加, 如果迭代过程中各节点电压没有同时更新, 如高斯-赛德尔迭代法和前推回代法, 则需要记录大量新增的噪声元, 给编程带来困难; 迭代得到的直接结果是节点电压复仿射形式, 而在工程运用中更需要知道的是节点电压的幅值区间和相角区间, 如何实现前者向后

者的准确转换, 目前尚无这方面的研究。

鉴于此, 本文采用复仿射描述分布式电源的不确定性, 建立了复仿射迭代形式的 Ybus 高斯区间潮流方程, 迭代过程中各节点电压更新步调一致, 编程简便。迭代过程中合并同一非线性运算产生的噪声元, 降低噪声元数量。在收敛后构建节点电压的复仿射多边形, 提出电压幅值区间值和相角区间值的计算方法。IEEE 33 节点系统算例结果表明, 与基于区间数 Ybus 高斯法和蒙特卡罗模拟法相比, 本文方法的迭代过程直观简便, 节点电压幅值区间值和相角区间值计算准确, 兼顾了区间潮流计算的效率和精度要求。

1 仿射数学及其运算

在仿射算术中, 仿射 \hat{X} 是由有限个噪声元线性叠加而成的不确定量^[17], 即有:

$$\hat{X} = x_0 + x_1 \varepsilon_1 + x_2 \varepsilon_2 + \dots + x_n \varepsilon_n = x_0 + \sum_{i=1}^n x_i \varepsilon_i \quad (1)$$

其中, ε_i 为噪声元, 范围为 $[-1, 1]$; x_i 为系数, 代表了噪声元 ε_i 所对应的不确定量的大小; x_0 为中心值; n 为噪声元个数。

1.1 实数域的仿射运算

仿射运算分为线性运算和非线性运算^[18-19], 其中线性运算包括加法、减法和数量乘法运算, 计算时不产生新的噪声元。

$$\begin{cases} \hat{X} \pm \hat{Y} = (x_0 \pm y_0) + (x_1 \pm y_1) \varepsilon_1 + \dots + (x_n \pm y_n) \varepsilon_n \\ \hat{X} \pm \lambda = (x_0 \pm \lambda) + x_1 \varepsilon_1 + x_2 \varepsilon_2 + \dots + x_n \varepsilon_n \\ \lambda \hat{X} = \lambda x_0 + \lambda x_1 \varepsilon_1 + \lambda x_2 \varepsilon_2 + \dots + \lambda x_n \varepsilon_n \end{cases} \quad (2)$$

其中, λ 为任意实数。

非线性运算主要包括乘法、除法、倒数、平方等运算, 计算时会产生新的噪声元。

$$\begin{cases} \hat{X} \hat{Y} = x_0 y_0 + \sum_{i=1}^n (x_0 y_i + y_0 x_i) \varepsilon_i + z_{n+1} \varepsilon_{n+1} \\ z_{n+1} = \left(\sum_{i=1}^n |x_i| \right) \left(\sum_{i=1}^n |y_i| \right) \end{cases} \quad (3)$$

收稿日期: 2016-03-14; 修回日期: 2017-01-16

基金项目: 福建省自然科学基金资助项目(2012J01203); 福建省科技计划重点项目(2013H0024)

Project supported by the Natural Science Foundation of Fujian Province(2012J01203) and Key Science & Technology Program of Fujian Province(2013H0024)

除法运算可以分解为乘法运算和倒数运算,此后采用切比雪夫逼近近似倒数运算,如式(4)所示。

$$\hat{X}/\hat{Y}=\hat{X}\left(1/\hat{Y}\right) \quad (4)$$

$$\begin{cases} \frac{1}{\hat{Y}}=\alpha_1\hat{Y}+\beta_1+\delta_1\varepsilon_{n+1} \\ \alpha_1=-\frac{1}{ab} \\ \beta_1=\frac{1}{2a}+\frac{1}{2b}+\frac{1}{\sqrt{ab}} \\ \delta_1=\frac{1}{2a}+\frac{1}{2b}-\frac{1}{\sqrt{ab}} \end{cases} \quad (5)$$

其中, a, b 分别为仿射 \hat{Y} 所对应区间数的下、上限。

平方运算的计算公式如式(6)所示。

$$\begin{cases} \hat{Y}^2=\alpha_2\hat{Y}+\beta_2+\delta_2\varepsilon_{n+1} \\ \alpha_2=a+b \\ \beta_2=-\frac{ab}{2}-\frac{(a+b)^2}{8} \\ \delta_2=\frac{(a+b)^2}{8}-\frac{ab}{2} \end{cases} \quad (6)$$

1.2 复数域的仿射运算

复仿射中噪声元的系数为复数,线性运算法则和实仿射相同。本文结合文献[20-21]的方法,将复仿射乘法定义为如式(7)所示。

$$\hat{X}\hat{Y}=\left(x_0+\sum_{i=1}^n x_i\varepsilon_i\right)\left(y_0+\sum_{i=1}^n y_i\varepsilon_i\right)=\left(x_0y_0+\sum_{i=1}^n x_iy_i\right)+\sum_{i=1}^n (x_0y_i+y_0x_i)\varepsilon_i+\left(\sum_{i=1}^n f(x_i)\right)\left(\sum_{i=1}^n f(y_i)\right)\varepsilon_{n+1} \quad (7)$$

其中,对任一复数 $z=r+jx$,函数 $f(\cdot)$ 定义为 $f(z)=|r|+j|x|$ 。

复仿射除法可以分解为仿射的乘法、平方及倒数运算。

$$\frac{\hat{X}}{\hat{Y}}=\left[\operatorname{Re}(\hat{X})+j\operatorname{Im}(\hat{X})\right]\left[\operatorname{Re}(\hat{Y})-j\operatorname{Im}(\hat{Y})\right]\times\frac{1}{\left[\operatorname{Re}(\hat{Y})\right]^2+\left[\operatorname{Im}(\hat{Y})\right]^2} \quad (8)$$

仿射可以通过含有相同的噪声元考虑不确定量之间的相互联系,因此采用仿射形式计算能得到比采用区间数运算更好的结果。区间潮流计算中需要进行多次迭代,若用区间数运算会使超宽度问题越来越严重,最终使解不可用。

复仿射运算对不确定性潮流计算结果的影响有两方面:一是对解的完备性的影响,也就是仿射潮流的运算结果是否能够完全包含实际的潮流变化范围;二是对解的保守性的影响,也就是仿射潮流的运算结果是否会远远大于实际的潮流变化范围,而使得计算结果不可用。以上复仿射运算法则能够保证解的完

备性,而解的保守性通常采用蒙特卡罗潮流来检验。

1.3 复仿射多边形

命题1:如果 x_1, \dots, x_n 在复平面上互不平行,则复仿射 $\hat{X}=\mathbf{x}_0+\mathbf{x}_1\varepsilon_1+\mathbf{x}_2\varepsilon_2+\dots+\mathbf{x}_n\varepsilon_n$ 的变动区域是复平面上关于 \mathbf{x}_0 中心对称的凸 $2n$ 边形。

设 $\hat{X}_0=\mathbf{x}_0, \hat{X}_i=\mathbf{x}_0+\sum_{k=1, i}^n \mathbf{x}_k\varepsilon_k (i=1, 2, \dots, n)$, 则 $\hat{X}_i=\hat{X}_{i-1}+\mathbf{x}_i\varepsilon_i$ 。记 \hat{X}_i 在复平面上的变动区域为 S_i 。

如果 S_{i-1} 在复平面上的位置已经确定,那么 S_i 可以由 S_{i-1} 拓展得到。拓展方法是:以 S_{i-1} 边界为起点画矢量 $\mathbf{x}_i\varepsilon_i$; ε_i 取极值1或-1,使得 $\mathbf{x}_i\varepsilon_i$ 位于 S_{i-1} 外部;在 S_{i-1} 边界上移动矢量 $\mathbf{x}_i\varepsilon_i$,则其末端轨迹即为 S_i 的边界。

$i=1$ 时, \hat{X}_1 在复平面上的变动范围是以 \mathbf{x}_0 为中心的线段 A_1B_1 。因为噪声元 $\varepsilon_1 \in [-1, 1]$,所以 A_1B_1 的长度等于 $2|\mathbf{x}_1|$,角度由 \mathbf{x}_1 决定,如图1(a)所示。

$i=2$ 时,有 $\hat{X}_2=\hat{X}_1+\mathbf{x}_2\varepsilon_2$ 。当 $\mathbf{x}_2\varepsilon_2$ 沿线段 A_1B_1 移动时, S_2 以线段 A_1B_1 为中心向两侧拓展。当 ε_2 取极值1或-1时, S_2 的边界是平行四边形 $A_2B_2C_2D_2$,边长 $|A_2B_2|=|C_2D_2|=|A_1B_1|=2|\mathbf{x}_1|, |A_2B_2|=|B_2C_2|=2|\mathbf{x}_2|$ 。 A_2D_2, B_2C_2 的角度由 \mathbf{x}_2 决定,如图1(b)所示。因此,

当 $i=2$ 时, \hat{X}_2 在复平面上的变动范围是以 \mathbf{x}_0 为中心对称的凸四边形。

同理,当 $i=3$ 时, S_3 沿四边形 $A_2B_2C_2D_2$ 的边向外拓展为凸六边形 $A_3B_3C_3D_3E_3F_3$,如图1(c)所示。其中,边长 $|A_3F_3|=|C_3D_3|=2|\mathbf{x}_3|, |A_3B_3|=|D_3E_3|=2|\mathbf{x}_2|, |B_3C_3|=|E_3F_3|=2|\mathbf{x}_1|$ 。

反复拓展后, S_n 为凸 $2n$ 边形,边长分别为 $2|\mathbf{x}_n|, 2|\mathbf{x}_{n-1}|, \dots, 2|\mathbf{x}_1|$,如图1(d)所示。

在以上拓展过程中,如果 \mathbf{x}_i 与 $\mathbf{x}_1, \dots, \mathbf{x}_{i-1}$ 中的一个平行,则该次拓展后的 S_i 边数不会增加,仍然与 S_{i-1} 的边数相等。因此有以下真命题。

命题2:如果 x_1, \dots, x_n 在复平面上可分为互不平行的 M 组,则复仿射 $\hat{X}_n=\mathbf{x}_0+\mathbf{x}_1\varepsilon_1+\mathbf{x}_2\varepsilon_2+\dots+\mathbf{x}_n\varepsilon_n$ 的变动区域是复平面上关于 \mathbf{x}_0 中心对称的凸 $2M$ 边形。其 $2M$ 条边两两平行且等长,边长是对应分组中所有噪声元系数模值之和的2倍。

命题2的推导过程和命题1是类似的。

由命题1和2可知,在迭代收敛后就可以由电压复仿射构建对应的复仿射多边形。

2 基于复仿射的Ybus高斯潮流迭代方法

目前求解区间潮流主要有Krawczyk-Moore区间迭代法^[11,14]和前推回代迭代法^[10,15-16],前者需要求解区间雅可比矩阵,过程较为繁琐,后者节点编号较为麻烦,编程不简便。本文在复仿射形式下用Ybus高

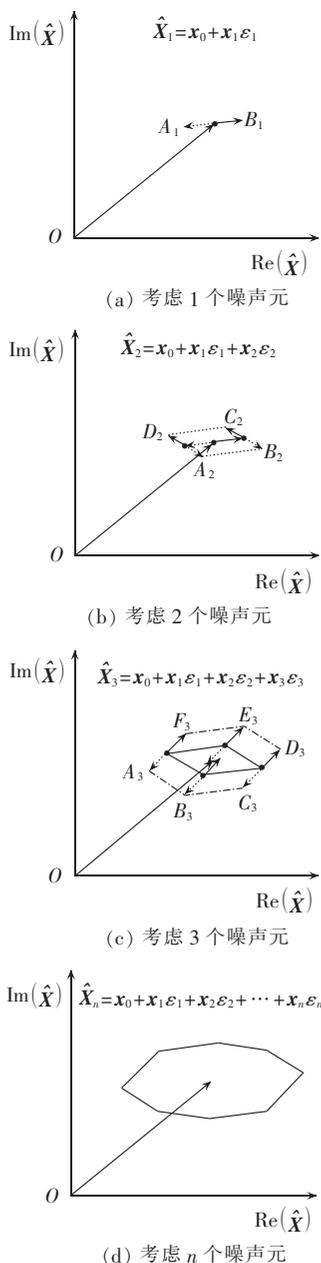


图 1 构造复仿射多边形

Fig.1 Construction of complex affine polygon

斯法^[22]进行迭代,过程直观,编程简便。

2.1 Ybus 高斯迭代

电网节点电压方程的分块矩阵形式如式(9)所示。

$$\begin{bmatrix} \mathbf{Y} & \mathbf{Y}_{ot} \\ \mathbf{Y}_{to} & \mathbf{Y}_{tt} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{U} \\ \mathbf{U}_t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{I} \\ \mathbf{I}_t \end{bmatrix} \quad (9)$$

解得:

$$\mathbf{U} = \mathbf{Y}^{-1}[\mathbf{I} - \mathbf{Y}_{ot} \mathbf{U}_t] \quad (10)$$

其中, \mathbf{U} 为节点电压; \mathbf{I} 为节点注入电流; t 为电网节点总数, 节点 t 是平衡节点; \mathbf{Y}_{ot} 和 \mathbf{Y}_{to} 为节点 t 和其他节点之间的互导纳构成的分块矩阵, 互为转置; \mathbf{Y}_{tt} 为节点 t 的自导纳; \mathbf{Y} 为整个电网节点导纳矩阵除去 \mathbf{Y}_{ot} 、 \mathbf{Y}_{to} 、 \mathbf{Y}_{tt} 后的分块矩阵。

将式(11)的节点注入电流代入式(10), 得到如

式(12)所示的复仿射迭代计算式。

$$\mathbf{I}_i = \left(\frac{\tilde{\mathbf{S}}_i}{\mathbf{U}_i} \right)^* = \frac{P_i - jQ_i}{\mathbf{U}_i^*} \quad (11)$$

$$\begin{bmatrix} \hat{\mathbf{U}}_1^{(k)} & \hat{\mathbf{U}}_2^{(k)} & \dots & \hat{\mathbf{U}}_{n-1}^{(k)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \left(\frac{\hat{\mathbf{S}}_1}{\hat{\mathbf{U}}_1^{(k-1)}} \right)^* - Y_{1n} \mathbf{U}_n \\ Y_{11} & Y_{12} & \dots & Y_{1n-1} \\ Y_{21} & Y_{22} & \dots & Y_{2n-1} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ Y_{n-11} & Y_{n-12} & \dots & Y_{n-1n-1} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \left(\frac{\hat{\mathbf{S}}_2}{\hat{\mathbf{U}}_2^{(k-1)}} \right)^* - Y_{2n} \mathbf{U}_n \\ \vdots \\ \left(\frac{\hat{\mathbf{S}}_{n-1}}{\hat{\mathbf{U}}_{n-1}^{(k-1)}} \right)^* - Y_{n-1n} \mathbf{U}_n \end{bmatrix} \quad (12)$$

其中, \mathbf{I}_i 、 \mathbf{U}_i 、 P_i 、 Q_i 、 $\tilde{\mathbf{S}}_i$ 分别为节点 i 的注入电流、节点电压、注入有功功率、注入无功功率、注入复功率; 上标 (k) 表示第 k 次迭代的结果; Y_{ij} 为节点 i 、 j 之间的互导纳。

受负荷波动及分布式电源出力的影响, 配电网中各节点注入功率具有不确定性, 因而节点 i 注入功率的复仿射形式为:

$$\hat{\mathbf{S}}_i = \tilde{\mathbf{S}}_{0i} + p_i \varepsilon_i + jq_i \gamma_i \quad i=1, 2, \dots, t-1 \quad (13)$$

其中, $\tilde{\mathbf{S}}_{0i}$ 为节点注入功率复仿射中心值; ε_i 、 γ_i 分别为节点 i 注入有功功率波动和无功功率波动的噪声元; 若节点 i 注入功率恒定, 则 p_i 、 q_i 都为 0。可见, 复仿射 $\hat{\mathbf{S}}_i$ 所表示的不确定域是复平面上的一个矩形。

2.2 噪声元合并

电压的不确定性是由节点功率不确定引起的, 所以电压复仿射自然就含有功率仿射中的噪声元, 应该采用与功率仿射相同的噪声元来描述电压仿射初始值。若节点数为 t 的网络中有 m 个节点的注入功率是波动的, 则电压仿射初始值为:

$$\hat{\mathbf{U}}_i = \mathbf{U}_{0i} = 1 + 0 \times \varepsilon_{k_1} + 0 \times \gamma_{k_1} + 0 \times \varepsilon_{k_2} + 0 \times \gamma_{k_2} + \dots + 0 \times \varepsilon_{k_m} + 0 \times \gamma_{k_m} \quad (14)$$

$$i=1, 2, \dots, t-1$$

其中, $k_l (l=1, 2, \dots, m)$ 为第 l 个功率波动节点的节点编号。

复仿射迭代过程中的非线性运算会产生新的噪声元。一次潮流迭代中, 式(12)每个迭代式右侧的除法运算 $\hat{\mathbf{S}}_i / \hat{\mathbf{U}}_i$ 转换为 2 次实仿射平方运算、1 次实仿射倒数运算及 2 次复仿射乘法运算, 各新增一个噪声元。共有 $t-1$ 个迭代式, 那么迭代 g 次后每个电压复仿射中含有的噪声元数量 N 为:

$$N = 2m + 5(t-1)g \quad (15)$$

式(15)表明噪声元数量与节点数成正比, 将极大地影响大型电网的计算速度。

在每次迭代计算后, 本文将 2 次平方运算所产生

的 $2(t-1)$ 个噪声元合并为一对, 倒数运算所产生的 $t-1$ 个噪声元合并为一对, 第 1 次乘法运算产生的 $t-1$ 个噪声元合并为一对, 第 2 次乘法运算产生的 $t-1$ 个噪声元合并为一对。合并后的每对噪声元系数分别为实数和虚数。则一次迭代结束后, 电压复仿射只会增加 8 个新的噪声元。

迭代 g 次后电压仿射中含有的噪声元数量 N 为:

$$N=2m+8g \quad (16)$$

可见, 在合并同类运算噪声元后, 迭代过程中噪声元数量大幅减少, 将有效提高潮流计算效率。

噪声元合并对计算结果的影响也体现在完备性和保守性两方面。

由命题 1, 复仿射变动区域是复平面上的一个凸中心对称多边形, 其形状与噪声元的数目和系数有关。因此噪声元合并对计算结果的影响也就表现为对复仿射多边形形状的影响。如果 g 次迭代后, 节点 i 的电压复仿射 $\hat{U}_i^{(g)}$ 在复平面上的变动区域为 S_1 , 某个非线性运算对其增加 $t-1$ 个噪声元后的变动区域为 S_2 , 那么根据命题 1 中对复仿射多边形的推导过程, 显然 S_2 完全覆盖了 S_1 。把 $t-1$ 个噪声元合并为 2 个噪声元, 就是只对 S_1 新增 2 个噪声元得到覆盖区域 S_3 。如果合并后新增噪声元的系数使得 S_3 恰好完全覆盖 S_2 , 那么这个合并过程只增加了第 g 次迭代解的保守性而没有影响完备性。

在第 g 次迭代得到同类非线性运算的一组噪声元系数后, 将这些噪声元的系数分别取实部和虚部, 取所有实部的绝对值之和作为一个噪声元的系数, 取所有虚部的绝对值之和乘以虚数单位作为另一个噪声元的系数, 可以保证合并过程不会破坏解的完备性。

此外, 为了保证合并过程不会影响下一次迭代解的完备性, 在矩阵与仿射列向量的乘法运算中, 首先按仿射数量乘法和仿射加法法则计算 $t-1$ 个噪声元的系数, 此后保留结果的实部和虚部符号不变, 将仿射加法改为按系数模值相加, 用新的结果替换原数值, 从而保证运算结果的复仿射多边形拓展到更宽的区域, 以避免噪声元合并影响下一代迭代解的完备性。

2.3 算法流程

采用合并噪声元后的复仿射潮流迭代算法如下。

步骤 1: 输入网络参数和波动分布式电源参数。

步骤 2: 按式(14)设置节点电压复仿射初始值。

步骤 3: 按式(12)进行潮流迭代计算。

步骤 4: 判断是否满足收敛条件, 若不满足收敛条件, 则返回步骤 3。

步骤 5: 构造电压复仿射多边形, 由复仿射多边形求得节点电压幅值区间值和相角区间值。

当迭代结果满足如式(17)所示的收敛条件时停止迭代过程。

$$\begin{cases} \max(|\underline{U}_{ie}^{(k)} - \underline{U}_{ie}^{(k-1)}|) < \Delta, \max(|\bar{U}_{ie}^{(k)} - \bar{U}_{ie}^{(k-1)}|) < \Delta \\ \max(|\underline{U}_{if}^{(k)} - \underline{U}_{if}^{(k-1)}|) < \Delta, \max(|\bar{U}_{if}^{(k)} - \bar{U}_{if}^{(k-1)}|) < \Delta \end{cases} \quad (17)$$

其中, Δ 为一个很小的正数, 取为 10^{-5} ; $\underline{U}_{ie}^{(k)}$ 、 $\bar{U}_{ie}^{(k)}$ 、 $\underline{U}_{if}^{(k)}$ 、 $\bar{U}_{if}^{(k)}$ 分别为第 k 次迭代后节点 i 电压的实部下限、实部上限、虚部下限、虚部上限。

3 电压复仿射到区间数的转换

以上潮流迭代收敛后, 得到的结果是节点电压复仿射, 需要转换为电压幅值区间值和相角区间值。

在复平面上, 复仿射的变动区域是凸多边形, 因此复仿射幅值最大、相角最大、相角最小所对应的点一定是凸多边形的顶点。如图 2 所示, \underline{U} 、 \bar{U} 分别表示电压复仿射 \hat{U} 的幅值下限和上限, $\underline{\theta}$ 、 $\bar{\theta}$ 分别表示 \hat{U} 的相角下限和上限, u_0 为电压复仿射中心值。

U 所对应的点不一定是距离原点最近的凸多边形顶点, 也有可能位于距离原点最近的一条边上。如图 3 所示, 图中点 A 即为最小幅值所对应的点, U 等于线段 AO 的长度。

在画出复仿射多边形以后, 就可以如图 2、图 3 计算节点电压的幅值区间值和相角区间值。

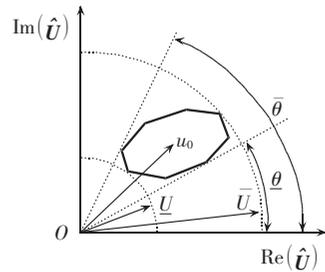


图 2 电压复仿射多边形示意图

Fig.2 Schematic diagram of voltage complex affine polygon

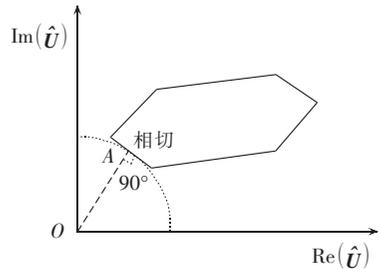


图 3 求取相切情况下的幅值最小值

Fig.3 Minimum amplitude in tangent condition

4 算例分析

以图 4 所示的 IEEE 33 节点系统为例对比本文方法(记为 CAA-Ybus)、基于 Ybus 高斯迭代和区间算术的方法(记为 RR-Ybus)、蒙特卡罗模拟法(抽样次数为 10^4 次)的计算结果。网络参数见文献[23], 并在节点 21、24、17、32 接入分布式电源, 分布式电源

参数如表 1 所示。分布式电源处理为 PQ 节点,功率因数为 0.95。平衡节点电压为 1 p.u。

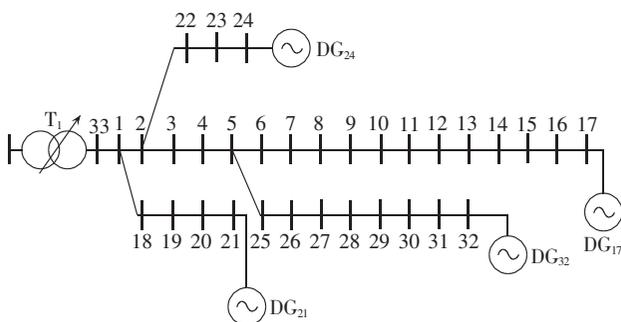


图 4 含分布式电源的 IEEE 33 节点系统
Fig.4 IEEE 33-bus system with DGs

表 1 分布式电源的波动参数

Table 1 Fluctuation parameters of DGs

分布式电源	输出功率 P/MW	无功功率 Q/Mvar	波动范围/%	复仿射形式
DG ₂₁	1.6	0.526	5	$0.16 + j0.0526 + 5\% \times 0.16 \varepsilon_{21} + j5\% \times 0.0526 \gamma_{21}$
DG ₂₄	1.5	0.493	10	$0.15 + j0.0493 + 10\% \times 0.15 \varepsilon_{24} + j10\% \times 0.0493 \gamma_{24}$
DG ₁₇	0.6	0.198	15	$0.06 + j0.0198 + 15\% \times 0.06 \varepsilon_{17} + j15\% \times 0.0198 \gamma_{17}$
DG ₃₂	0.9	0.296	20	$0.09 + j0.0296 + 20\% \times 0.09 \varepsilon_{32} + j20\% \times 0.0296 \gamma_{32}$

采用蒙特卡罗潮流算法检验 CAA-Ybus 法的解的完备性。

以节点 1 为例,图 5 中多边形是 CAA-Ybus 法计算得到的电压复仿射多边形,数据点是蒙特卡罗法的模拟计算结果,图中电压相量实部、虚部均为标么值,后同。

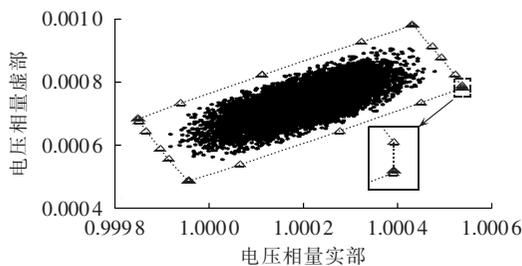


图 5 节点 1 电压复仿射和蒙特卡罗计算结果
Fig.5 Node-1 voltages calculated by complex affine and Monte-Carlo

图 5 中多边形完全包含了数据点,并且十分贴近数据点域,说明 CAA-Ybus 法计算结果具备完备性和准确性。由于电压复仿射中大部分噪声元的系数非常小,所以图中多边形近似为四边形,局部放大可以发现是多边形的图形。

仍以节点 1 电压计算结果为例,图 6 中分别是合并和不合并噪声元所对应的电压复仿射多边形。不合并噪声元时,复仿射多边形相对圆滑柔和;合并噪声元时,复仿射多边形相对棱角分明。但从总体来

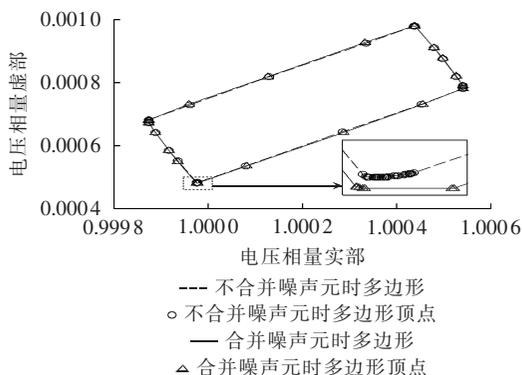


图 6 合并噪声元对结果的影响(节点 1 电压复仿射)
Fig.6 Influence of noise element merging on results (complex affine of Node-1 voltage)

看,合并过程没有影响解的完备性,最后得到的节点电压幅值区间和相角区间也是极为接近的。

此后从 CAA-Ybus 的复仿射计算节点电压幅值区间值和相角区间值,并与 RR-Ybus 法、蒙特卡罗法的结果对比,如图 7、图 8 所示,图 7 中电压幅值区间为标么值。

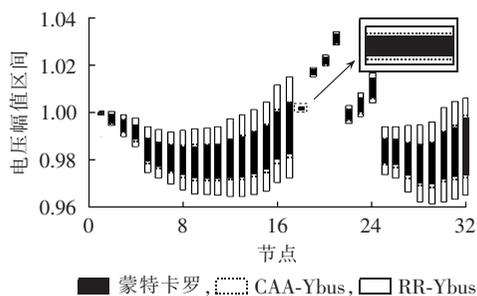


图 7 3 种方法的节点电压幅值区间
Fig.7 Voltage amplitude intervals calculated by three methods

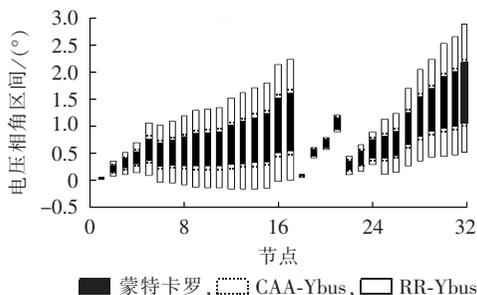


图 8 3 种方法的节点电压相角区间
Fig.8 Voltage phase-angle intervals calculated by three methods

从图 7、图 8 可以看出,RR-Ybus 法的结果区间值超出蒙特卡罗法结果较大,因而过于保守。相比之下,本文方法的结果区间值都刚好包含蒙特卡罗方法的区间值,而比 RR-Ybus 方法得到的区间值要窄很多,因而更为准确。

5 结论

由于不能忽略分布式电源出力的不确定性,配电

网的调度运行中需要首先求解不确定性潮流,从而解决分布式电源并网的优化运行问题。采用复仿射形式的区间潮流算法具有参数获取简便、准确的优点,但计算速度受噪声元数量影响很大,且计算结果为复仿射形式,难以转换为区间值。

本文提出了复仿射迭代形式的Ybus高斯区间潮流算法,通过合并同一运算产生的噪声元提高区间潮流计算速度,通过构建复仿射多边形以便更准确地计算电压幅值区间值和相角区间值。与此前方法相比,本文方法很大程度上克服了区间潮流的保守性问题,得到的区间值更接近真实结果。IEEE 33节点系统的结果对比验证了本文方法的有效性和准确性。

本文方法的优势首先在于复仿射运算的应用,其次是噪声元的合并,再次是电压复仿射到区间值的求解方法。这3个元素也可以应用到其他不确定性潮流算法中,本文采用Ybus高斯迭代是因为其编程实现过程更简单方便。

参考文献:

- [1] GUAN X, LIU W H E, PAPALEXOPOULOS A D. Application of a fuzzy set method in an optimal power flow[J]. Electric Power Systems Research, 1995, 34(1): 11-18.
- [2] BIJWE P R, RAJU G K V. Fuzzy distribution power flow for weakly meshed systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2006, 21(4): 1645-1652.
- [3] 吴杰, 颜秉超, 梁婷婷. 含双馈风机的配电网模糊谐波潮流计算[J]. 电力自动化设备, 2011, 31(12): 72-76.
WU Jie, YAN Bingchao, LIANG Tingting. Calculation of fuzzy harmonic load flow for distribution network with doubly fed induction generator[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(12): 72-76.
- [4] 陈雁, 文劲宇, 程时杰. 考虑输入变量相关性的概率潮流计算方法[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(22): 80-87.
CHEN Yan, WEN Jinyu, CHENG Shijie. Probabilistic load flow analysis considering dependencies among input random variables[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(22): 80-87.
- [5] 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.
- [6] 方斯顿, 程浩忠, 徐国栋, 等. 基于Nataf变换和准蒙特卡罗模拟的随机潮流方法[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(8): 38-44.
FANG Sidun, CHENG Haozhong, XU Guodong, et al. Probabilistic load flow method based on Nataf transformation and quasi Monte Carlo simulation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(8): 38-44.
- [7] 曹佳, 严正, 李建华, 等. 含风电场交直流混联系统的概率潮流计算[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(11): 94-101.
CAO Jia, YAN Zheng, LI Jianhua, et al. Probabilistic power flow calculation for AC/DC hybrid system with wind farms[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(11): 94-101.
- [8] 黄煜, 徐青山, 卞海红, 等. 基于拉丁超立方采样技术的半不变量法随机潮流计算[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(11): 112-119.
HUANG Yu, XU Qingshan, BIAN Haihong, et al. Cumulant method based on Latin hypercube sampling for calculating probabilistic power flow[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(11): 112-119.
- [9] 周竞, 王珂, 石飞, 等. 计及源荷双侧响应的概率潮流计算方法[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(8): 76-81, 89.
ZHOU Jing, WANG Ke, SHI Fei, et al. Probabilistic power flow algorithm considering source-side and load-side responses[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(8): 76-81, 89.
- [10] 王守相, 张国栋, 王成山. 复区间潮流保守性问题的解决方案[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(19): 25-30.
WANG Shouxiang, ZHANG Guodong, WANG Chengshan. Solution to conservative property of complex interval power flow[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(19): 25-30.
- [11] 裴爱华, 刘明波, 张弛. 考虑负荷不确定性的区间潮流计算方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2004, 16(6): 24-27.
PEI Aihua, LIU Mingbo, ZHANG Chi. Interval algorithm for power flow calculation with uncertain load[J]. Proceedings of the CSU-EPSS, 2004, 16(6): 24-27.
- [12] 丁涛, 郭庆来, 柏瑞, 等. 采用带预处理的区间Hull算法求解区间直流潮流[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(3): 130-136.
DING Tao, GUO Qinglai, BAI Rui, et al. Solving of interval DC power flow using interval Hull algorithm with preconditioning[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(3): 130-136.
- [13] 孙东磊, 韩学山, 张波. 电力系统运行协同的区间有功优化潮流[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(1): 97-104.
SUN Donglei, HAN Xueshan, ZHANG Bo. Synergetic interval optimal active power flow of power system operation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(1): 97-104.
- [14] 丁涛, 崔翰韬, 顾伟, 等. 基于区间和仿射运算的不确定潮流算法[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(13): 51-55.
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.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] COMBA J, STOLFI J. Affine arithmetic and its applications to computer graphics[M]. Rio de Janeiro, Brazil: Brazilian Symposium on Computer Graphics and Image, 1993: 9-18.
- [18] STOLFI J, DE FIGUEIREDO L H. Self-validated numerical methods and applications[M]. Rio de Janeiro, Brazil: Monograph for 21st Brazilian Mathematics Colloquium, IMPA, 1997: 43-66.
- [19] DE FIGUEIREDO L H, STOLFI J. Affine arithmetic: concepts and

- applications[J]. Numerical Algorithms, 2004, 37(1-4):147-158.
- [20] MANSON G. Calculating frequency response functions for uncertain systems using complex affine analysis[J]. Journal of Sound and Vibration, 2005, 288(3):487-521.
- [21] GU W, LUO L, DING T, et al. An affine arithmetic-based algorithm for radial distribution system power flow with uncertainties[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2014, 58:242-245.
- [22] 黄玲. Y_BUS 并行潮流算法研究及应用[D]. 北京:华北电力大学, 2009.
- HUANG Ling. The research and application of Y_BUS parallel flow algorithm[D]. Beijing:North China Electric Power University, 2009.

- [23] BARAN M E, WU F F. Network reconfiguration in distribution-systems for loss reduction and load balancing[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1989, 4(2):1401-1407.

作者简介:



王树洪

王树洪(1989—),男,广东湛江人,硕士研究生,主要研究方向为分布式电源的接入及运行(E-mail:610621456@qq.com);
邵振国(1970—),男,江苏南通人,教授,博士,通信作者,主要研究方向为电能质量、电力系统优化运行及电力系统稳定与控制(E-mail:shao.zg@fzu.edu.cn)。

Interval power-flow algorithm based on complex affine Ybus-Gaussian iteration considering uncertainty of DG operation

WANG Shuhong, SHAO Zhenguo

(College of Electrical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350116, China)

Abstract: An interval power-flow equation based on the complex affine Ybus-Gaussian iteration is established, which applies the complex affine to describe the uncertainties of DG outputs and state variables. With the consideration of both efficiency and accuracy of interval power-flow calculation, similar noise elements are merged to suppress the noise element increase during the iteration. The complex affine is adopted to calculate the intervals of voltage amplitude and phase-angle. IEEE 33-bus system is applied to verify the effectiveness and correctness of the proposed method.

Key words: distribution network; distributed generation; interval power-flow; complex affine; Ybus-Gaussian iteration; noise element; power-flow calculation; uncertainty

(上接第 37 页 continued from page 37)

Power-flow calculation for distribution network with PMU

WAN Rong, XUE Hui

(College of Information and Electrical Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: Though the power-flow calculation with the consideration of PMUs (Phasor Measurement Units) in distribution network is theoretically accurate, reliable and fast, PMU effects the practical applications due to its measuring error. IEEE 33-bus distribution system is adopted to test the traditional back/forward sweep algorithm and the back/forward sweep algorithm with weak sensitivity to the variation of load static voltage characteristics respectively and results show that, when the measuring error of PMU is not considered, the traditional back/forward sweep algorithm can ensure the accuracy of power-flow calculation and improve the convergence rate; when the measuring error of PMU is considered, the back/forward sweep algorithm with weak sensitivity to the variation of load static voltage characteristics has better error-resistant performance; the calculation accuracy of both algorithms when PMU is equipped at normal node is higher than that when it is equipped at DG node.

Key words: distribution network; power-flow calculation; distributed power generation; phasor measurement unit; static voltage characteristics; back/forward sweep algorithm