

计及不确定性的电力系统电压波动分析方法

彭 琰¹, 余一平¹, 鞠 平¹, 黄晓明², 娄伯良², 黄弘扬²

(1. 河海大学 能源与电气学院, 江苏 南京 211100;

2. 国网浙江省电力公司 电力科学研究院, 浙江 杭州 310014)

摘要: 针对输电网中新负荷需求和新能源发电出力不确定性带来的电压波动问题, 基于电流方程比功率方程非线性程度低、线性化误差小的特点, 提出了一种基于注入电流灵敏度的电压波动区间分析方法。该方法有效计及了新负荷有功和无功需求的不确定性以及新能源发电输出功率的不确定性, 并采用注入电流灵敏度减小了对潮流方程直接线性化带来的误差, 然后利用区间线性方程组高斯消去法进行迭代求解, 从而准确快速地得到功率不确定情况下各节点电压的波动区间。通过新英格兰 10 机 39 节点系统和某 500 kV 实际输电网进行仿真分析, 并与蒙特卡洛法计算结果进行对比, 验证了所提方法的高效性和精确性。

关键词: 电力系统; 电压波动; 不确定性; 电流灵敏度; 区间分析方法

中图分类号: TM 761

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2017.08.018

0 引言

电力系统电压问题一直是研究人员和运行人员关注的焦点, 确定系统下的电压稳定和电压安全问题已有比较成熟和经典的分析方法^[1]。近年来, 随着新能源和新负荷的快速发展和广泛接入, 其带来的电源和负荷的随机性和波动性对电网电压的安全性造成重大挑战。在此背景下, 本文以电力系统电压为切入点, 研究功率不确定情况下的电压波动问题。

针对输电网中不确定性问题的处理, 主要分析方法有概率潮流法^[2-5]、模糊数学法^[6-9]和区间分析方法^[10-14]等。在实际工程中, 概率潮流法和模糊数学法所需要的确定性参数获取往往比较困难, 对重要参数的确定主要基于人为设定, 分析所得的结果往往与实际情况相差较大。区间分析方法作为一种重要的考虑不确定性的分析方法, 主要用于处理外延确定、内涵不确定的信息。区间分析方法所需参数主要为不确定量的上下界, 一般能够较为简单地获取且精度较高, 所得分析结果也较为准确, 因此其工程实用价值也更高。

针对大量风电并网引入的随机性因素导致系统电压波动, 文献^[15]运用随机潮流方法得到了风电场并网后各节点电压的概率分布, 从统计学的角度给出了随机因素导致的电压波动。文献^[16-19]将区间分析方法运用到潮流计算中, 用以解决负荷和风力发电波动带来的不确定性问题, 进而得到电压波动区间。但这种直接的区间潮流算法存在结果保守的问题。因此, 文献^[20-22]将仿射运算运用到

区间潮流的计算中, 得到了更为精确的区间潮流解。虽然文献^[22]对噪声元进行了部分合并, 但是基于仿射迭代求解的区间潮流在仿射运算获取噪声幅值时仍然需要根据节点数量进行多次的灵敏度计算, 因而迭代次数会随系统规模的增大而不断增多, 当系统规模增大时潮流计算速度会快速降低, 且可能存在潮流收敛性的问题。文献^[23]将区间潮流的求解转化为约束潮流进行求解, 进一步将该约束潮流问题分解为 2 个确定性的约束优化子问题, 在一定程度上降低了区间潮流运算的难度, 但其物理意义不明晰。

针对以往计及不确定因素区间分析方法收敛性差、计算速度慢的问题, 本文基于电流方程比功率方程非线性程度低、线性化误差小的特点, 采用注入电流灵敏度, 结合区间分析方法, 提出了基于注入电流灵敏度的电压波动区间分析方法。该方法减小了对潮流方程直接线性化带来的误差, 需要较少的迭代次数, 在功率波动量较小时甚至无需迭代。首先推导了注入电流灵敏度的计算方法, 然后给出了基于注入电流灵敏度的电压波动区间分析方法的基本原理, 最后采用所提方法对功率随机波动下新英格兰 10 机 39 节点系统和实际省级电网的电压波动进行仿真分析, 验证了本文所提方法的有效性和准确性, 其兼顾了电压波动计算的效率和精度。

1 注入电流灵敏度法

基于电力系统潮流方程, 对输电网采用注入电流形式的网络模型如下:

$$I_i = Y_{si} U_i + \sum_{j \in N(i)} Y_{ij} (U_i - U_j) \quad (1)$$

写成注入功率的形式, 可得:

$$P_i + j Q_i = Y_{si}^* U_i^2 + \sum_{j \in N(i)} Y_{ij}^* (U_i^2 - U_i U_j^*) \quad (2)$$

收稿日期: 2017-04-13; 修回日期: 2017-07-07

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973 计划)资助项目(2013-CB228204)

Project supported by the National Basic Research Program of China(973 Program)(2013CB228204)

式(2)的实部和虚部分别为节点 i 注入有功和注入无功。对式(2)的实部和虚部分别除以节点 i 的电压 U_i , 得到节点注入有功电流和无功电流的表达式如下:

$$I_{Pi} = U_i \sum_{j \in N(i)} G_{ij} - \sum_{j \in N(i)} U_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \quad (3)$$

$$I_{Qi} = -U_i B_{si} - U_i \sum_{j \in N(i)} B_{ij} + \sum_{j \in N(i)} U_j (B_{ij} \cos \theta_{ij} + G_{ij} \sin \theta_{ij}) \quad (4)$$

其中, G_{ij} 、 B_{ij} 、 B_{si} 分别为线路的互电导、互电纳、节点对地电纳。实际电力系统中, 在波动较小的情况下对系统进行线性化带来的误差较小, 其精度将在后文中进行校核。对于网络中的 m 个 PQ 节点, 将其注入无功电流方程线性化, 能够得到无功电流波动的表达式为:

$$\Delta I_{q, PQ} = \mathbf{B}_B \Delta \mathbf{U}_{PQ} + \mathbf{B}_A \Delta \boldsymbol{\theta}_{PQ} \quad (5)$$

对于 $m+n$ 个 PQ 和 PV 节点, 将其注入有功电流方程线性化, 得到:

$$\Delta I_{p, PQ+PV} = \mathbf{B}_C \Delta \mathbf{U}_{PQ+PV} + \mathbf{B}_D \Delta \boldsymbol{\theta}_{PQ+PV} \quad (6)$$

写成向量的形式有:

$$\begin{bmatrix} \Delta I_q \\ \Delta I_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{B}_B & \mathbf{B}_A \\ \mathbf{B}_C & \mathbf{B}_D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \mathbf{U} \\ \Delta \boldsymbol{\theta} \end{bmatrix} \quad (7)$$

其中, 各子矩阵元素计算如下(矩阵元素计算式中的电压和相角均采用稳态值):

$$B_{Bij} = \begin{cases} -\sum_{j \in N(i)} B_{ij} - B_{si} & i=j \\ B_{ij} \cos \theta_{ij} + G_{ij} \sin \theta_{ij} & i \neq j \end{cases} \quad (8)$$

$$B_{Aij} = \begin{cases} \sum_{j \in N(i)} U_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} - B_{ij} \sin \theta_{ij}) & i=j \\ U_j (B_{ij} \sin \theta_{ij} - G_{ij} \cos \theta_{ij}) & i \neq j \end{cases} \quad (9)$$

$$B_{Cij} = \begin{cases} \sum_{j \in N(i)} G_{ij} & i=j \\ -G_{ij} \cos \theta_{ij} - B_{ij} \sin \theta_{ij} & i \neq j \end{cases} \quad (10)$$

$$B_{Dij} = \begin{cases} -\sum_{j \in N(i)} U_j (B_{ij} \cos \theta_{ij} - G_{ij} \sin \theta_{ij}) & i=j \\ -U_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) & i \neq j \end{cases} \quad (11)$$

其中, \mathbf{B}_B 、 \mathbf{B}_A 、 \mathbf{B}_C 、 \mathbf{B}_D 分别为 $m \times m$ 阶、 $m \times (m+n)$ 阶、 $(m+n) \times m$ 阶和 $(m+n) \times (m+n)$ 阶矩阵。对线性方程组式(7)采用高斯消元法进行求解, 即能够得到网络注入有功和无功电流波动时对应的电压幅值波动和相角波动。

此处需要特别注意的是, 以往的灵敏度法绝大多数采用的是注入功率的表示方式, 对应的线性方程组如下^[1]:

$$\begin{bmatrix} \Delta \mathbf{Q} \\ \Delta \mathbf{P} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{B}'_B & \mathbf{B}'_A \\ \mathbf{B}'_C & \mathbf{B}'_D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \mathbf{U} \\ \Delta \boldsymbol{\theta} \end{bmatrix} \quad (12)$$

比较式(3)、(4)和式(2), 本文采用的是注入有功电流和注入无功电流的表示方式, 此种计算方法相对于基于注入功率的计算方法具有相对较低的非线性, 在线性化时具有更小的误差。

综上, 基于注入电流算法的步骤如下:

a. 已知节点功率波动和稳态电压值, 计算节点有功和无功电流的波动量;

b. 利用式(7)得到电压波动的估计值以及功率波动后的节点电压;

c. 利用计算所得波动后的节点电压及功率波动, 返回步骤 a 计算;

d. 根据设定的收敛判据, 停止迭代, 得到最终电压波动的计算值。

在本文的算法验证算例中, 经测试, 迭代 2 次所得结果的收敛性已经较好, 更多的迭代次数对计算结果收敛性的提升不明显。实际应用过程中, 应根据计算系统的规模, 设定收敛判据, 得到电压波动的计算值。

2 基于注入电流的电压波动区间分析方法

2.1 区间数和区间线性方程组

区间分析方法于 1966 年由 Moore 提出, 主要用于获取不确定性因素作用下计算结果的上下界, 得到计算结果的边界信息, 但不关注区间内部信息, 以此提高计算结果的参考价值。

区间数的一般定义如下: $[x] = [\underline{x}, \bar{x}]$, 即 $[x]$ 是满足 $\underline{x} \leq x \leq \bar{x}$ 的所有 x 的集合, \underline{x} 和 \bar{x} 分别为区间数 $[x]$ 的下界和上界。区间数之间满足如下四则运算的规则:

$$[X] + [Y] = [\underline{x} + \underline{y}, \bar{x} + \bar{y}]$$

$$[X] - [Y] = [\underline{x} - \bar{y}, \bar{x} - \underline{y}]$$

$$[X] \times [Y] = [\min(\underline{x} \times \underline{y}, \underline{x} \times \bar{y}, \bar{x} \times \underline{y}, \bar{x} \times \bar{y}), \max(\underline{x} \times \underline{y}, \underline{x} \times \bar{y}, \bar{x} \times \underline{y}, \bar{x} \times \bar{y})]$$

$$[X] / [Y] = [\underline{x}, \bar{x}] \times [1/\bar{y}, 1/\underline{y}] \quad 0 \notin [\underline{y}, \bar{y}]$$

与之对应的, 具有区间特性的线性方程组如下:

$$[\mathbf{A}][\mathbf{x}] = [\mathbf{b}] \quad (13)$$

其中, $[\mathbf{A}]$ 为区间参数矩阵; $[\mathbf{x}]$ 为区间解向量; $[\mathbf{b}]$ 为区间常数向量。对区间线性方程组的求解, 使用较多的是区间高斯消去法, 具体可以分为消元、回代和次序调整 3 个步骤, 其类似于一般线性方程组的高斯消去法, 但不同之处在于区间线性方程组中变量为区间数, 并采用区间数的运算法则。

2.2 电压波动计算的区间分析方法

考虑到电力系统中新能源电厂出力和有功、无功负荷需求的不确定性, 下面采用区间分析方法对该不确定性进行分析。假定发电机实际出力和负荷的有功需求波动 $\Delta \mathbf{P}$ 在 $[\underline{\Delta \mathbf{P}}, \overline{\Delta \mathbf{P}}]$ 内变化, 记为区间数 $[\Delta \mathbf{P}]$, 对应的有功电流的波动区间数为 $[\Delta \mathbf{I}_p]$; 负荷无功需求 $\Delta \mathbf{Q}$ 在 $[\underline{\Delta \mathbf{Q}}, \overline{\Delta \mathbf{Q}}]$ 内变化, 记为 $[\Delta \mathbf{Q}]$, 对应

的无功电流波动为 $[\Delta I_q]$ 。电压波动和相角波动的区间数分别为 $[\Delta U]$ 和 $[\Delta \theta]$ 。

则对应的区间数学模型如下:

$$\begin{bmatrix} [\Delta I_q] \\ [\Delta I_p] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_B & B_A \\ B_C & B_D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [\Delta U] \\ [\Delta \theta] \end{bmatrix} \quad (14)$$

对于节点 i 而言,有:

$$[\Delta I_{pi}] = [\Delta P_i] / U_i \quad (15)$$

$$[\Delta I_{qi}] = [\Delta Q_i] / U_i \quad (16)$$

综上,基于注入电流法的区间分析方法步骤如下:

a. 设定各节点功率波动的区间数和稳态电压值,计算得到注入电流的区间数;

b. 根据式(14)得到电压波动的区间数及功率波动区间数;

c. 利用所得电压波动区间数和功率波动区间数,返回步骤 a 计算;

d. 根据设定的收敛判据,停止迭代,得到最终电压波动的区间数。

所得结果可以描述电力系统中发电机有功出力 and 负荷有无功需求的不确定性导致的系统中节点电压的不确定性。

本文在 MATLAB 环境下编写区间分析方法的程序,在已知功率波动区间数的情况下,求解得到电压幅值的区间数。最后,编写了基于注入电流灵敏度法的蒙特卡洛仿真程序,对比区间分析方法求得的电压幅值的上下界,以证明采用区间分析方法所得结果的准确性。由于区间分析方法主要关注于计算结果的上下界,所以算例中采用蒙特卡洛法计算时认为注入功率的分布为均匀分布。

3 算例精度分析

3.1 注入电流法精度分析

采用新英格兰 10 机 39 节点系统分单独有功波动、单独无功波动和恒定功率因数波动 3 种典型场景对注入电流法进行验证。

a. 单独有功波动情景。

设定所有的负荷节点和发电机节点的有功波动范围为 $-30\% \sim 30\%$,选取典型节点,对比 BPA 仿真结果和本文算法得到的节点电压幅值(标么值),如图 1 所示。图中实线为 BPA 仿真结果,虚线为本文算法计算结果。

b. 无功单独波动情景。

设定所有负荷节点无功需求波动范围为 $-30\% \sim 30\%$,对比 BPA 仿真结果和本文算法所得节点电压幅值(标么值),如图 2 所示。图中实线为 BPA 仿真结果,虚线为本文算法计算结果。

c. 恒定功率因数波动情景。

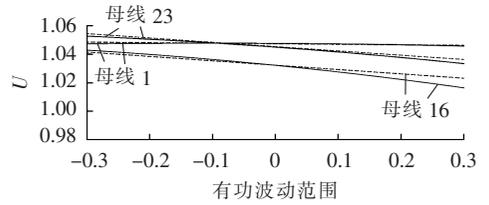


图 1 有功波动情景下电压曲线

Fig.1 Voltage curves during active power fluctuation

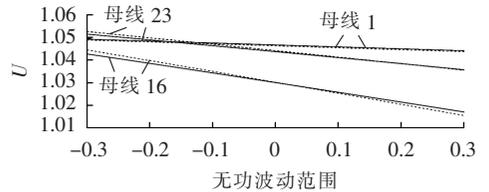


图 2 无功波动情景下电压曲线

Fig.2 Voltage curves during reactive power fluctuation

设定各负荷节点视在功率波动范围为 $-30\% \sim 30\%$,功率因数保持不变,同时设定发电机节点的有功波动范围为 $-30\% \sim 30\%$,对比 BPA 仿真结果和本文算法所得节点电压幅值(标么值),如图 3 所示。图中实线为 BPA 仿真结果,虚线为本文算法计算结果。

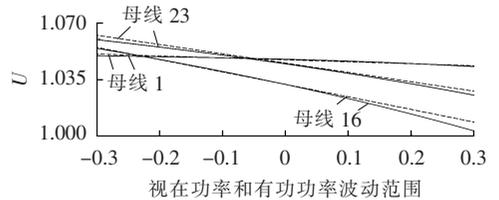


图 3 恒功率因数功率波动情景下电压曲线

Fig.3 Voltage curves during power fluctuation with constant power factor

对上述 3 种场景下的计算结果进行分析能够得出:系统中有功和无功波动都将对节点电压造成影响,且在相同量级下,无功波动对电压影响更大;当负荷和发电机功率的波动范围为 $-30\% \sim 30\%$ 时,各节点电压的计算误差均小于 0.5%,说明了本文算法在正常功率波动范围内的计算结果较为准确。

3.2 区间分析方法精度分析

同样采用 10 机 39 节点系统进行区间分析方法的验证。

对于 39 节点系统而言,为了使计算结果更具典型性,本算例中负荷功率波动设定为恒定功率因数的波动方式。设定系统中发电机有功出力和负荷有功需求波动的区间数 $[\Delta P]$ 为 $[-0.2P_0, 0.2P_0]$,负荷无功波动的区间数 $[\Delta Q]$ 为 $[-0.2Q_0, 0.2Q_0]$,其中 P_0 和 Q_0 分别为稳态时节点注入有功和无功向量。对比采用区间分析方法和蒙特卡洛法得到的电压幅值的计算结果。

39 节点系统利用区间分析方法和蒙特卡洛法

可分别得到电压幅值计算结果。由区间分析方法计算结果和潮流的稳态解对比能够得到,稳态电压幅值均位于区间分析方法结果的区间内。

为了更加直观地对比 2 种算法的计算结果,选取系统中部分典型节点的电压幅值计算结果(标么值)进行对比,如图 4 所示。

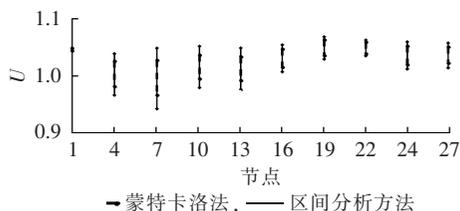


图 4 39 节点系统 2 种算法计算结果对比

Fig.4 Comparison of calculative results between two methods for 39-bus power system

由图 4 可知,区间分析方法能够略为保守地对功率波动下电压幅值波动进行估计,且相比于蒙特卡洛法,区间分析方法在效率上具有巨大的优势。对该 39 节点系统而言,基于 MATLAB 平台,蒙特卡洛法的实际运算时间约为区间分析方法的 910 倍,若系统规模增大,则区间分析方法在效率上的优势将更加明显。

以蒙特卡洛法的计算结果作为基准,对基于注入电流法的区间分析方法进行误差分析,见表 1。

表 1 39 节点系统区间分析方法的计算误差

Table 1 Calculation errors of interval analysis method for 39-bus power system

节点电压	最大误差/%	最小误差/%	平均误差/%
上界	2.17	0.12	0.99
下界	2.50	0.12	0.92

由表 1 可知,区间分析方法所得各个节点电压波动(上界和下界)的误差稍有差别,但平均误差小于 1%。

4 实际电网计算分析

为了进一步说明本文算法用于实际系统电压波动计算的可行性,采用某省 500 kV 高压输电系统夏季高峰运行方式算例进行验证。

在该算例系统中,主要节点为某省内高压输电网 500 kV 母线,对与该省内 500 kV 母线相连的外省节点,根据此种运行方式下联络线功率等值为 PQ 节点。省内各节点类型按照该运行方式规定进行确定。

设定省内各负荷节点的有功需求波动和发电机出力波动为 $[-0.2P_0, 0.2P_0]$, 负荷节点的无功需求波动为 $[-0.2Q_0, 0.2Q_0]$ 。对比该算例系统中蒙特卡洛法和区间分析方法计算结果。

该实际算例系统较第 3 节中 39 节点系统而言,系统规模扩大接近一倍,此时蒙特卡洛法计算时间

约是区间分析方法用时的 2000 倍。由计算结果能够得知,在该实际算例系统中,区间分析方法也能够有效对电压波动范围进行确定。2 种算法对典型节点电压波动的计算结果(标么值)如图 5 所示。

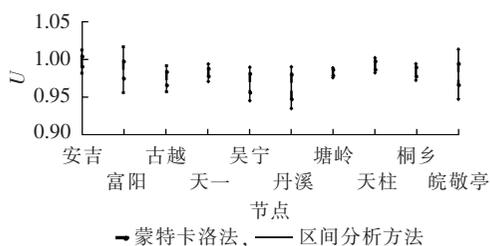


图 5 500 kV 输电网 2 种算法计算结果对比

Fig.5 Comparison of calculative results between two methods for 500 kV transmission network

以蒙特卡洛法计算结果为基准,对区间分析方法进行误差分析,如表 2 所示。

表 2 500 kV 输电网区间分析方法的计算误差

Table 2 Calculation errors of interval analysis method for 500 kV transmission network

节点电压	最大误差/%	最小误差/%	平均误差/%
上界	2.06	0.04	0.73
下界	2.08	0.04	0.72

对比 2 种算法得到的电压波动范围及计算误差可知,在本测试系统中区间分析方法能够得到电压波动范围较为准确的估计,说明了区间分析方法用于确定实际电力系统电压波动范围的可行性。

在确定电压波动的上下界时,区间分析方法本质上是若干点值运算的结合。以往对于功率波动时电压上下界确定的过程中,较多地使用注入功率的上下界进行 2 次确定性的潮流计算,以此作为电压幅值上下界的估算,但实际电力系统中的功率波动多是有功和无功同时波动的形式,有功波动对电压幅值的影响方向不能够明显确定。因此,仅利用 2 种确定性潮流计算得到电压波动范围的方法,不能够反映实际系统的运行情况。另外,由于基于注入电流灵敏度的区间分析方法中,大部分的运算都为线性运算,所以其适用于计算及不确定性的规模高压输电系统的电压波动。

5 结论

随着新能源和新负荷的快速发展,其功率波动不确定性对电网电压波动的影响日益显著。本文提出了计及功率波动不确定性的基于注入电流灵敏度的电压波动区间分析方法,通过将注入电流灵敏度法引入区间分析,降低区间迭代的次数,减小潮流方程直接线性化带来的误差。同时由于本文算法中绝大部分计算为线性计算,因此对系统中变量个数不敏感,在较大系统中应用优势较为明显,适用于实际

大电网分析。新英格兰 10 机 39 节点系统和实际省级电网的计算分析结果表明:本文方法仅需较少的计算量即能获得较为精确的结果,计算效率较高,且不存在收敛性问题,适用于分析及新能源和新负荷等功率不确定性的大电网电压波动问题。

参考文献:

- [1] THIERRY V C,COSTAS V. 电力系统电压稳定性[M]. 王奔,译. 北京:电子工业出版社,2008:153-155.
- [2] 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.
- [3] 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.
ZHOU Jing,WANG Ke,SHI Fei,et al. Probabilistic power flow algorithm considering source-side and load-side response [J]. Electric Power Automation Equipment,2016,36(8):76-81.
- [4] REN Z,WANG K,LI W,et al. Probabilistic power flow analysis of power systems incorporating tidal current generation[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy,2017,8(3):1195-1203.
- [5] NI F,NGUYEN P,COBBEN J F G. Basis-adaptive sparse polynomial chaos expansion for probabilistic power flow[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2017,32(1):694-704.
- [6] 张程飞,刘纯,王跃峰,等. 基于模糊多目标优化的电网日前风电接纳能力评估模型[J]. 电网技术,2015,39(2):426-431.
ZHANG Chengfei,LIU Chun,WANG Yuefeng,et al. A fuzzy multi-objective optimization based evaluation model of wind power accommodation capacity[J]. Power System Technology,2015,39(2):426-431.
- [7] 刘阳,肖先勇,张逸,等. 敏感过程电压暂降响应事件及其风险的区间直觉模糊评估[J]. 电网技术,2015,39(5):1398-1404.
LIU Yang,XIAO Xianyong,ZHANG Yi,et al. Interval-valued intuitionistic fuzzy assessment on response event of voltage-sag-sensitive process and its risk[J]. Power System Technology, 2015,39(5):1398-1404.
- [8] 马瑞,李文晔,李晖,等. 分布式冷热电联供系统负荷随机模糊建模[J]. 电力系统自动化,2016,40(15):53-58.
MA Rui,LI Wenye,LI Xuan,et al. Random fuzzy model for load of distributed combined cooling,heating and power system [J]. Automation of Electric Power Systems,2016,40(15):53-58.
- [9] 肖运启,王昆朋,贺贵举,等. 基于趋势预测的大型风电机组运行状态模糊综合评价[J]. 中国电机工程学报,2014,34(13):2132-2139.
XIAO Yunqi,WANG Kunpeng,HE Guanju,et al. Fuzzy comprehensive evaluation of operating condition of large-scale wind turbines based on trend prediction[J]. Proceedings of the CSEE, 2014,34(13):2132-2139.
- [10] 鲍海波,韦化,郭小璇. 考虑新能源的交直流系统区间最优潮流[J]. 中国电机工程学报,2015,35(16):4006-4014.
BAO Haibo,WEI Hua,GUO Xiaoxuan. Interval optimal power flow calculation for AC/DC power system considering renewable energy source[J]. Proceedings of the CSEE,2015,35(16):4006-4014.
- [11] BAI L,JIANG T,LI F,et al. Confidence interval estimates for loading margin sensitivity for voltage stability monitoring in the presence of renewable energy [C]//IEEE Power and Energy Society General Meeting. [S.l.]:IEEE,2016:1-5.
- [12] 刘明波,冯小峰. 考虑区间耦合和无功均衡的二级电压控制器设计[J]. 电工技术学报,2017,32(6):220-230.
LIU Mingbo,FENG Xiaofeng. Design of secondary voltage controllers considering coupling areas and balance of reactive power outputs[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017,32(6):220-230.
- [13] XU C,GU W,GAO F,et al. Improved affine arithmetic based optimisation model for interval power flow analysis[J]. IET Generation Transmission & Distribution,2016,10(15):3910-3918.
- [14] LIAO X,LIU K,ZHANG Y,et al. Interval method for uncertain power flow analysis based on Taylor inclusion function[J]. IET Generation Transmission & Distribution,2017,11(5):1270-1278.
- [15] 别朝红,刘辉,李甘,等. 含风电场电力系统电压波动的随机潮流计算与分析[J]. 西安交通大学学报,2008,42(12):1500-1505.
BIE Zhaohong,LIU Hui,LI Gan,et al. Voltage fluctuation of a power system with wind farms integrated by probabilistic load flow[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University,2008,42(12): 1500-1505.
- [16] 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-EPSA,2004,16(6):24-27.
- [17] 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.
- [18] 王守相,徐群,张高磊,等. 风电场风速不确定性建模及区间潮流分析[J]. 电力系统自动化,2009,33(21):82-86.
WANG Shouxiang,XU Qun,ZHANG Gaolei,et al. Modeling of wind speed uncertainty and interval power flow analysis for wind farms[J]. Automation of Electric Power Systems,2009,33(21):82-86.
- [19] PIRNIA M,CAÑIZARES C A,BHATTACHARYA K,et al. An affine arithmetic method to solve the stochastic power flow problem based on a mixed complementarity formulation [C]// Power and Energy Society General Meeting. [S.l.]:IEEE,2012: 1-7.
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] 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 complex affine Ybus-Gaussian iteration considering

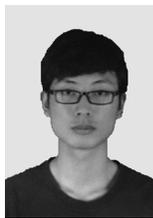
uncertainty of DG operation [J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(3): 38-44.

[23] 汪超群, 韦化, 鲍海波, 等. 基于区间不确定性的约束潮流[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(20): 72-77.

WANG Chaoqun, WEI Hua, BAO Haibo, et al. Constrained power flow based on interval uncertainty [J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(20): 72-77.

作者简介:

彭 琰(1993—), 男, 湖北随州人, 硕士研究生, 主要研



彭 琰

究方向为电力系统分析与控制 (E-mail: py6762467@yeah.net);

余一平(1977—), 男, 浙江衢州人, 副教授, 博士, 通信作者, 主要研究方向为电力系统的建模与控制 (E-mail: yyiping@hhu.edu.cn);

鞠 平(1962—), 男, 江苏靖江人, 教授, 博士研究生导师, 博士, 主要研究方向为电力系统建模与控制 (E-mail: pju@hhu.edu.cn)。

Voltage fluctuation analysis method considering uncertainties of power system

PENG Yan¹, YU Yiping¹, JU Ping¹, HUANG Xiaoming², LOU Boliang², HUANG Hongyang²

(1. School of Energy and Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China;

2. Electric Power Research Institute, State Grid Zhejiang Electric Power Corporation, Hangzhou 310014, China)

Abstract: Aiming at the voltage fluctuations caused by the uncertainties of new load demand and new energy generation in transmission network, an interval analysis method of voltage fluctuation is proposed based on the sensitivity of injecting current since the current equation has lower nonlinear degree and smaller linearization error than power equation, which effectively takes consideration of the active and reactive demand uncertainties of new load and the power-output uncertainty of new energy generation, applies the sensitivity of injecting current to avoid the linearization errors of power-flow equations, and adopts the Gaussian elimination method for solving the interval linear equations to accurately and rapidly obtain the voltage fluctuation range of each node with uncertain power. Simulative analysis is performed for New England 10-machine 39-bus system and a real 500 kV transmission system, and the simulative results are compared with the calculative results of Monte Carlo method to verify the high efficiency and accuracy of the proposed method.

Key words: electric power systems; voltage fluctuation; uncertainty; current sensitivity; interval analysis method