

基于可信性理论的含风电电力系统电压稳定概率评估

杨悦^{1,2}, 李国庆², 王振浩²

(1. 华北电力大学 电气与电子工程学院, 北京 102206;

2. 东北电力大学 电力系统安全运行与节能技术国家地方联合工程实验室, 吉林 吉林 132012)

摘要: 由于风速变化对大规模风电并网后的电力系统电压稳定造成影响, 提出了对风速进行模糊模拟的可信性静态电压稳定分析方法。该方法不仅能够计算出含有不确定因素时系统降阶雅可比矩阵对角元素的期望值和均方差, 而且建立了基于可信性意义下的静态电压稳定指标。该方法避免了不确定参数分布函数类型的假设和参数统计对分析结果的影响, 仅需根据不确定参数的实际变化范围和描述不确定参数的隶属度函数类型确定计算结果。最后, 与采用两点估计法和蒙特卡洛仿真法后的计算结果进行对比, 证明了所提方法在计算精度和计算量方面的优越性。

关键词: 电力系统; 风电; 静态电压稳定; 可信性理论; 模糊模拟; 概率评估; 稳定性; 隶属度函数

中图分类号: TM 614; TM 712.3

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2014.12.002

0 引言

随着经济的飞速发展, 能源问题已经成为人类面临的最严峻问题之一。风能作为清洁可再生能源具有储量巨大、分布广泛且无污染等优点, 使得风力发电技术成为目前重要的研究方向之一^[1]。而风电接入改变了传统电力系统的结构参数, 产生了一些新的问题。

风电接入电力系统后的电压稳定一直是专家关注的难题, 因此研究接入风电场后的电力系统静态电压稳定问题是十分必要的。传统的电压稳定分析大多基于确定性模型, 而风电的加入使系统模型中节点注入功率具有不确定性。为了解决确定性分析方法无法考虑随机因素影响的问题, 研究人员提出了基于概率的电压稳定分析方法。

常用的概率分析方法主要有: 蒙特卡洛法、解析法、近似法等。蒙特卡洛法^[2-4]通过大量反复抽样仿真来模拟电压稳定分析中节点功率、设备故障等不确定情况, 但仿真次数较多、耗时较长; 解析法^[2,5-7]是采用数学假设对所研究问题进行线性化处理, 计算效率较高, 其中半不变量法应用较多; 近似法^[2,8-9]是根据已知随机变量的概率分布, 采用近似公式求取待求变量的统计特性, 其中以点估计法和一次二阶矩法为代表。以上这些概率分析方法均是在假定了不确定参数的概率统计特征的前提下再进行仿真计算, 而不确定参数概率统计特征的准确性会从根本上影响计算的结果。

本文提出对不确定参数进行模糊模拟的可信性电压稳定概率评估方法。该方法不需要假定不确定

参数的分布函数类型和参数, 就可以对大规模风电并网后的电力系统静态电压稳定问题进行分析。

1 可信性理论

在电力系统这个复杂的物理系统中, 许多问题同时包含了随机性与模糊性 2 类不确定因素, 应进行综合性评估。而公理化的模糊性与随机性的综合评估方法就被称为可信性理论^[10]。可信性理论是 2004 年基础数学领域完成的数学分支, 它给出了基于测度论的模糊论的公理化体系, 并提供了随机性与模糊性综合评估的严格数学基础。

下面对可信性理论中的一些基本概念进行简要说明。

给定一个论域 Γ , $P(\Gamma)$ 是 Γ 的幂集, P_{os} 是一个定义在 $P(\Gamma)$ 上的集函数, 被称为一个可能性测度。若满足下面的 2 个条件, 则称三元组 $(\Gamma, P(\Gamma), P_{os})$ 为可能性空间。

a. $P_{os}(\emptyset) = 0, P_{os}(\Gamma) = 1$;

b. 对于任意的 $P(\Gamma)$ 的子集 $\{A_i | i \in I\}$, 其中 I 是任意的指标集, 有 $P_{os}(\bigcup_{i \in I} A_i) = \sup_{i \in I} P_{os}(A_i)$ 。

基于可能性测度, 文献^[11]定义了自对偶集函数 C_r 如下。

定义 1 设三元组 $(\Gamma, P(\Gamma), P_{os})$ 是一个可能性空间。若定义集函数 C_r 为:

$$C_r(A) = \frac{1}{2} (1 + P_{os}(A) - P_{os}(A')) \quad A \in P(\Gamma) \quad (1)$$

则称 C_r 为事件 A 的可信性测度。其中, A' 是集合 A 的补集。

三元组 $(\Gamma, P(\Gamma), C_r)$ 称为可信性空间^[12]。

定义 2^[12] 设三元组 $(\Gamma, P(\Gamma), C_r)$ 是可信性空间。若 $\xi = (\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n)$ 是从 Γ 到实数空间 $\mathbf{R}^n$ 上的集

收稿日期: 2013-08-15; 修回日期: 2014-06-28

基金项目: 长江学者和创新团队发展计划 (IRT1114)

Project supported by Changjiang Scholars and Innovative Team Development Plan (IRT1114)

函数,则称 ξ 是定义在可信性空间上的模糊向量。特别地,当 $n=1$ 时, ξ 称为模糊变量。

定义 3^[13] 设 $\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n$ 是定义在可信性空间 $(\Gamma, P(\Gamma), C_r)$ 上的模糊变量。若对于 P 上的任意子集 $B_1, B_2, \dots, B_n$ 满足:

$$C_r\{\gamma|\xi_1(\gamma)\in B_1, \xi_2(\gamma)\in B_2, \dots, \xi_n(\gamma)\in B_n\} = \min_{1\leq i\leq n} C_r\{\gamma|\xi_i(\gamma)\in B_i\} \quad (2)$$

则认为模糊变量 $\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n$ 相互独立。其中, γ 表示设定的某一事件。

在可信性测度基础上,文献[11]给出了模糊变量期望值算子的定义。若满足:

$$\min\left\{\int_0^\infty C_r\{\xi_i\geq r\}dr, \int_{-\infty}^0 C_r\{\xi_i\leq r\}dr\right\} < \infty \quad (3)$$

则模糊变量 ξ_i 的期望值可以定义为式(4)所示。

$$E(\xi_i) = \int_0^\infty C_r\{\xi_i\geq r\}dr - \int_{-\infty}^0 C_r\{\xi_i\leq r\}dr \quad (4)$$

并且,若满足:

$$\max\left\{\int_0^\infty C_r\{\xi_i\geq r\}dr, \int_{-\infty}^0 C_r\{\xi_i\leq r\}dr\right\} < \infty \quad (5)$$

则称模糊变量 ξ_i 的期望值是有限的。

参考文献[14],设 ξ 是三角模糊变量 $(-1, 2, 3)$, 计算 ξ 的期望 $E[\xi]$ 。

对于任意的 $0\leq r<2$,有:

$$C_r\{\xi_i\geq r\} = \frac{1}{2}(1 + P_{os}\{\xi_i\geq r\} - P_{os}\{\xi_i\leq r\}) = \frac{1}{2}\left(1 + 1 - \frac{r+1}{3}\right) = \frac{5-r}{6} \quad (6)$$

对于任意的 $2\leq r<3$,有:

$$C_r\{\xi_i\geq r\} = \frac{1}{2}(1 + P_{os}\{\xi_i\geq r\} - P_{os}\{\xi_i\leq r\}) = \frac{1}{2}(1 + 3 - r - 1) = \frac{3-r}{2} \quad (7)$$

对于任意的 $-1\leq r<0$,有:

$$C_r\{\xi_i\leq r\} = \frac{1}{2}(1 + P_{os}\{\xi_i\leq r\} - P_{os}\{\xi_i\geq r\}) = \frac{1}{2}\left(1 + \frac{r+1}{3} - 1\right) = \frac{r+1}{6} \quad (8)$$

由模糊变量 ξ 的期望值定义可得:

$$E[\xi] = \int_0^2 \frac{5-r}{6} dr + \int_2^3 \frac{3-r}{2} dr - \int_{-1}^0 \frac{r+1}{6} dr = \frac{3}{2} \quad (9)$$

由以上的计算过程可得,对于一般的三角模糊变量、梯形模糊变量的期望值,有如下的结论:

a. 若 ξ 是三角模糊变量 (r_1, r_2, r_3) , 则 ξ 的期望值是 $\frac{1}{4}(r_1 + 2r_2 + r_3)$;

b. 若 ξ 是梯形模糊变量 (r_1, r_2, r_3, r_4) , 则 ξ 的期望值是 $\frac{1}{4}(r_1 + r_2 + r_3 + r_4)$ 。

引理 1^[15] 若 ξ, η 是定义在可能性空间 $(\Gamma, P(\Gamma))$,

P_{os} 上期望值有限且相互独立的模糊变量,则对于任意的实数 a 和 b ,有 $E[a\xi + b\eta] = aE[\xi] + bE[\eta]$ 。

可信性理论的相关内容可以参阅文献[12, 16]。

2 基于可信性理论的电压稳定概率评估

2.1 灵敏度分析法

电力系统静态电压稳定分析方法有很多,其中灵敏度分析法物理概念明确,计算简单,易于实现,在潮流计算的基础上,只需少量的额外计算,便能得到所需的指标,在电压稳定分析研究中得到了广泛的应用^[17]。

线性化静态系统功率-电压方程可以表示为:

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{P\theta} & J_{PU} \\ J_{Q\theta} & J_{QU} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\theta \\ \Delta U \end{bmatrix} = J \begin{bmatrix} \Delta\theta \\ \Delta U \end{bmatrix} \quad (10)$$

其中, ΔP 为有功注入增量; ΔQ 为无功注入增量; $J_{P\theta}$ 、 J_{PU} 、 $J_{Q\theta}$ 、 J_{QU} 为极坐标下雅可比矩阵 J 的分块矩阵; $\Delta\theta$ 为电压相角增量; ΔU 为电压幅值增量。

一般而言,系统的有功和无功变化都会影响系统的电压稳定性,而因为支路的电抗远大于支路的电阻,所以母线电压对无功注入 Q 的变化比对有功注入 P 的变化更为敏感。为简化计算,在每个运行点上只考虑 Q 和 U 之间的关系^[18]。令式(10)中 $\Delta P=0$, 可得:

$$\begin{cases} \Delta Q = (J_{QU} - J_{Q\theta} J_{P\theta}^{-1} J_{PU}) \Delta U = J_R \Delta U \\ \Delta U = J_R^{-1} \Delta Q \end{cases} \quad (11)$$

其中, $J_R = J_{QU} - J_{Q\theta} J_{P\theta}^{-1} J_{PU}$, 称为降阶雅可比矩阵,它反映了母线电压值的变化 ΔU 与无功注入的变化 ΔQ 间的线性关系。

J_R 矩阵中的第 i 个对角元素是节点 i 的 $U-Q$ 灵敏度^[19]。若 J_R 矩阵的对角元素全为正且不是无穷大,则系统是电压稳定的;若 J_R 矩阵的对角元素不全为正,则系统是电压不稳定的。

2.2 静态电压稳定可信性指标

可信性理论在电力系统中已得到初步应用^[20]。接入风电场的电力系统,其风速的不确定性影响了静态电压稳定分析结果的准确性。本文针对风速不确定性,将可信性理论应用到大规模风电并网后的电力系统的静态电压稳定分析中。

根据灵敏度分析方法,应用可信性理论,可建立在可信性意义下各个节点电压的稳定指标:

$$L = C_r\{f(\xi) > 0 \text{ \& } f(\xi) < \infty\} \quad (12)$$

其中, ξ 为风速, $f(\xi)$ 为该风速下 J_R 矩阵的对角元素,风速 ξ 即为本文设定的模糊向量。该静态电压稳定指标表示在可能出现的风速为 ξ 情况下, J_R 矩阵的各个对角元素 $f(\xi)$ 大于 0 且小于无穷大的可能性为 L 。 L 的取值范围为 0~1,反映了不确定因素时 J_R 矩阵对角元素的分布情况; L 的值越大,表明对应节点

的电压稳定性越好;反之表明对应节点的电压稳定性越差。若 $L=1$,表示 J_R 矩阵对角元素一定大于 0。若系统中各个节点的 L 都为 1,说明整个系统具有较好的静态电压稳定性。

2.3 基于可信性理论的电压静态稳定分析计算步骤

对于接入风电场的电力系统,设其风速为不确定参数,则 J_R 矩阵的对角元素即可表示为风速的函数。基于可信性理论的静态电压稳定性分析的步骤如图 1 所示^[21]。图中,“ $\wedge$ ”表示取小运算;“ $\vee$ ”表示取大运算; σ 为连续取样后各个相对时刻的离散风速值; $\sigma(\theta_k)$ 为 θ_k 时刻的风速离散值; ξ 为风速连续值; r_r 为对角元素最大值与最小值之间的一个任意数。

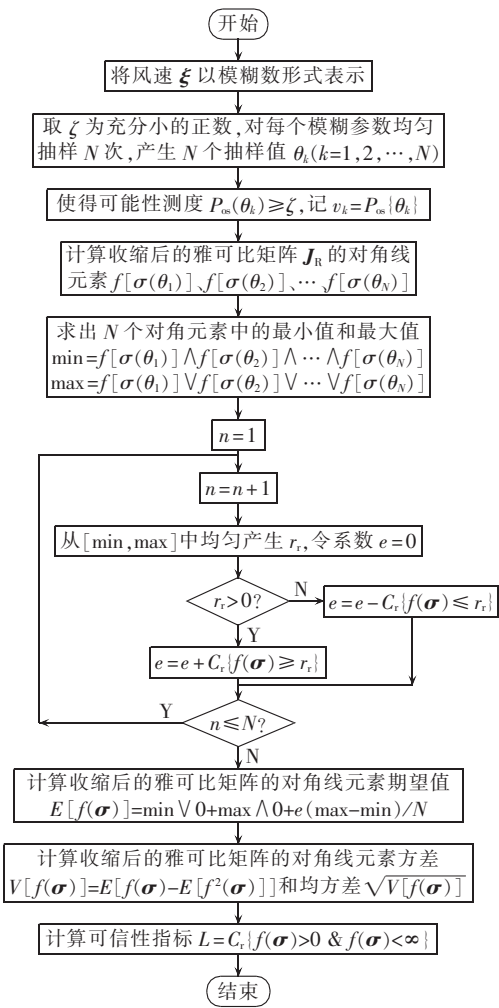


图 1 分析步骤流程图

Fig.1 Flowchart of analysis steps

3 算例分析

3.1 IEEE 14 节点系统

本文采用的第一个算例是对 IEEE 14 节点系统进行修改,在节点 1 接入一个等值风电机组,该等值风电机组代表一个 30 台额定有功功率为 2 MW 的

双馈感应风电机组的风电场(见图 2),其中 C 表示无功补偿设备。根据接入风电场的电力系统运行的实际情况,风速具有极大不确定性,将风速设定为不确定参数,根据风速预测结果,确定其区间数形式。根据经验值,无穷大取 999^[19]。采用 MATLAB 和 PSAT 电力系统分析软件进行静态电压稳定分析。

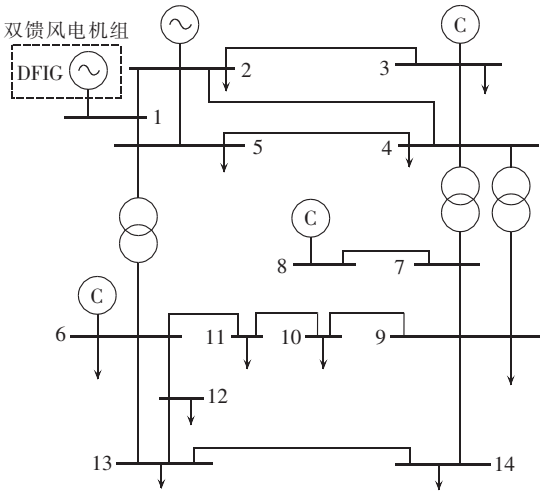


图 2 含风电场的 IEEE 14 节点电力系统

Fig.2 IEEE 14-bus power system with wind farm

3.1.1 不同模糊隶属度函数对静态电压稳定分析的影响

分别采用三角隶属度函数和梯形隶属度函数来表征模糊数的分布,并计算在上述 2 种隶属度函数假设下的对角元素的期望值和均方差,以及各节点的电压稳定指标。

表 1 给出了采用三角隶属度函数和梯形隶属度函数计算得到的基于可信性理论的 J_R 矩阵对角元

表 1 不同隶属度函数所得 J_R 矩阵对角元素期望值、均方差、电压稳定可信性指标

Table 1 Expectation and mean square error of diagonal elements of J_R matrix for different membership function types, and corresponding voltage stability credibility index

节点	对角元素期望值		对角元素均方差		电压稳定可信性指标	
	三角隶属度函数	梯形隶属度函数	三角隶属度函数	梯形隶属度函数	三角隶属度函数	梯形隶属度函数
1	0.2755	0.2752	0.0007	0.0041	0.672	0.678
2	48.8930	48.8810	0.0009	0.0003	1	1
3	12.1381	12.1382	0.0089	0.0068	1	1
4	64.1632	64.1630	0.0006	0.0001	1	1
5	5.5310	5.5318	0.0034	0.0008	0.982	0.985
6	28.8047	28.8011	0.0043	0.0011	1	1
7	23.1114	23.1213	0.0006	0.0021	1	1
8	2.9840	2.9781	0.0081	0.0062	0.891	0.881
9	38.6141	38.6328	0.0001	0.0019	1	1
10	16.3318	16.3318	0.0012	0.0005	1	1
11	11.7463	11.7489	0.0003	0.0003	1	1
12	1.7429	1.7458	0.0002	0.0078	0.811	0.792
13	18.9823	18.9798	0.0055	0.0002	1	1
14	6.2225	6.2213	0.0001	0.0025	0.988	0.989

素期望值、均方差和各节点电压稳定的可信性指标。由于节点 1 连接了一台表示风电场的等值风机,而风速的变化使节点 1 的电压稳定性较其他节点略低些。节点 1 的电压稳定可信性指标值分别为 0.672 和 0.678,略小于其他节点的电压稳定可信性指标值,这与实际运行是吻合的。从表 1 中可以看出,采用不同的隶属度函数计算所得的对角元素期望值、均方差和电压稳定可信性指标相差很小,可以忽略。因此,采用不同隶属度函数对计算结果的影响不大。

3.1.2 抽样次数对结果的影响

为研究抽样次数对计算结果的影响,以三角隶属度函数为例,分别对该算例进行了 9 次、90 次、900 次抽样计算。表 2—4 分别给出了不同抽样次数计算所得的 J_R 矩阵对角元素期望值、均方差及各节点电压稳定可信性指标。

表 2 不同抽样次数所得 J_R 矩阵对角元素期望值
Table 2 Expectation of diagonal elements of J_R matrix for different sampling times

节点	对角元素期望值			节点	对角元素期望值		
	9 次	90 次	900 次		9 次	90 次	900 次
1	0.2752	0.2755	0.2757	8	2.9824	2.9840	2.9844
2	48.8990	48.8930	48.8930	9	38.6129	38.6141	38.6139
3	12.1368	12.1381	12.1380	10	16.3217	16.3318	16.3218
4	64.1634	64.1632	64.1631	11	11.7478	11.7463	11.7466
5	5.5290	5.5310	5.5330	12	1.7443	1.7429	1.7428
6	28.8041	28.8047	28.8047	13	18.9822	18.9823	18.9823
7	23.1117	23.1114	23.1113	14	6.2229	6.2225	6.2224

表 3 不同抽样次数所得 J_R 矩阵对角元素均方差
Table 3 Mean square error of diagonal elements of J_R matrix for different sampling times

节点	对角元素均方差			节点	对角元素均方差		
	9 次	90 次	900 次		9 次	90 次	900 次
1	0.0043	0.0040	0.0041	8	0.0055	0.0045	0.0043
2	0.0006	0.0003	0.0003	9	0.0001	0	0
3	0.0081	0.0082	0.0079	10	0.0007	0.0007	0.0006
4	0.0001	0.0001	0.0001	11	0.0009	0.0008	0.0007
5	0.0012	0.0011	0.0011	12	0.0089	0.0083	0.0081
6	0.0003	0.0002	0.0002	13	0.0006	0.0005	0.0005
7	0.0002	0.0002	0.0002	14	0.0034	0.0030	0.0030

表 4 不同抽样次数所得电压稳定可信性指标
Table 4 Voltage stability credibility index for different sampling times

节点	电压稳定可信性指标			节点	电压稳定可信性指标		
	9 次	90 次	900 次		9 次	90 次	900 次
1	0.636	0.662	0.672	8	0.893	0.891	0.891
2	1	1	1	9	1	1	1
3	1	1	1	10	1	1	1
4	1	1	1	11	1	1	1
5	0.979	0.982	0.983	12	0.800	0.811	0.809
6	1	1	1	13	1	1	1
7	1	1	1	14	0.983	0.988	0.987

显然,抽样次数越多,均方差越小,即计算结果的精度越高。但也发现,对于该算例,抽样次数达到

90 次时已经与抽样 900 次时的计算结果基本相等,所以抽样次数可根据系统规模和计算精度进行选取。

3.1.3 与其他方法计算结果的对比

为验证本文方法的有效性,将本文方法与两点估计法、蒙特卡洛法的结果进行了对比。其中,基于可信性理论方法选用三角隶属度函数表征,抽样 90 次;两点估计法采用正态分布表征不确定参数风速的分布;蒙特卡洛法进行 900 次仿真计算。图 3—5 分别给出了应用本文方法、两点估计法和蒙特卡洛法进行仿真得到的 J_R 矩阵对角元素特征根期望值、均方差及各节点的电压稳定可信性指标的对比结果。

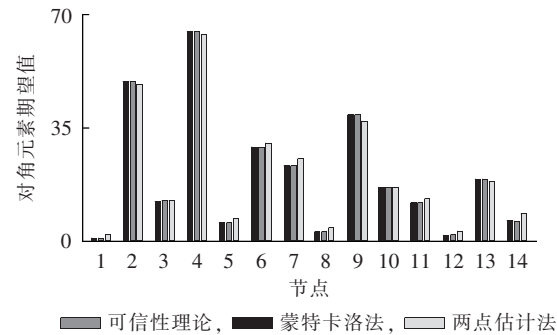


图 3 不同方法所得 J_R 矩阵对角元素期望值

Fig.3 Expectation of diagonal elements of J_R matrix for different methods

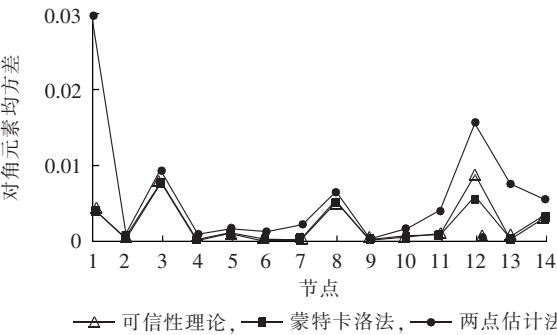


图 4 不同方法所得 J_R 矩阵对角元素均方差

Fig.4 Mean square error of diagonal elements of J_R matrix for different methods

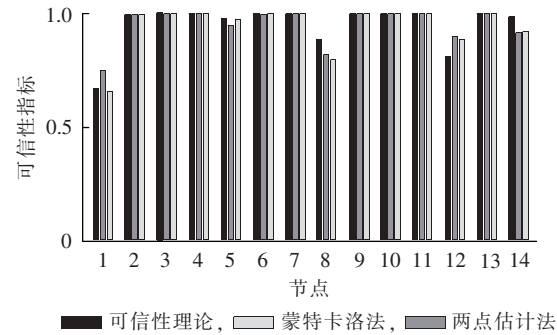


图 5 不同方法所得的电压稳定可信性指标

Fig.5 Voltage stability credibility index for different methods

从图 3、图 4 中可以看出,可信性理论法与蒙特卡洛法计算所得的 J_R 矩阵对角元素期望值和均方

差都非常接近。一般认为蒙特卡洛法是较接近实际的^[22],所以认为可信性理论较两点估计法更接近实际结果。观察图 5 中 3 种方法得到的各节点电压稳定可信性指标可知:对于节点 1 的可信性指标,蒙特卡洛法和可信性理论得到稳定指标分别为 0.672 和 0.658,而两点估计法得到的稳定指标为 0.751,与其他 2 种方法相差较远,结果偏乐观。

蒙特卡洛法需要通过大量反复抽样,对抽样值分别进行仿真计算,工作量大,对于实际电力系统而言不可行,而两点估计法虽然计算量最小,但其不确定参数分布类型的假设对结果的影响较大(见表 5)。表 5 为分别以正态分布和 Weibull 分布表示风速分布时得到的 J_R 矩阵对角元素期望值、均方差和可信性指标。而在 2.1 节所述可信性理论中采用不同隶属度函数表征风速时对结果的分布影响较小。因此,可信性理论法较两点估计法能得到更为稳定的计算结果。

表 5 不同分布函数所得 J_R 矩阵对角元素期望值、均方差和电压稳定可信性指标

Table 5 Expectation and mean square error of diagonal elements of J_R matrix for different distribution function types, and corresponding voltage stability credibility index

节点	对角元素期望值		对角元素均方差		电压稳定可信性指标	
	正态分布	Weibull 分布	正态分布	Weibull 分布	正态分布	Weibull 分布
1	1.9752	1.4752	0.0302	0.0402	0.698	0.658
2	45.8870	47.8870	0.0011	0.0109	1	1
3	14.1371	12.1371	0.0092	0.0897	1	1
4	61.1657	63.1657	0.0011	0.0212	1	1
5	9.5300	6.5300	0.0015	0.0011	0.991	0.976
6	28.8089	29.8089	0.0012	0.0019	1	1
7	28.1107	25.1107	0.0021	0.0031	1	1
8	2.9821	3.9821	0.0065	0.0131	0.867	0.799
9	34.6130	36.6130	0.0001	0.0002	1	1
10	15.3345	16.3345	0.0015	0.0016	1	1
11	13.7459	12.7459	0.0038	0.0006	1	1
12	2.9448	2.9448	0.0156	0.0008	0.821	0.882
13	17.9889	17.9889	0.0078	0.0019	1	1
14	8.2225	6.2225	0.0055	0.0055	0.939	0.922

3.2 IEEE 30 节点系统

本文采用的第二个算例是对 IEEE 30 节点系统进行修改,在节点 3、9、12 分别接入双馈等值风电机组、异步风电机组和永磁风电机组。这 3 个等值风电机组分别代表由 30 台额定有功功率为 2 MW 的双馈感应风电机组组成的风电场、30 台额定有功功率为 1.5 MW 的异步风电机组组成的风电场和 30 台额定有功功率为 2 MW 的永磁同步发电机组组成的风电场。

表 6 给出了采用三角隶属度函数和梯形隶属度函数计算得到的基于可信性理论的 J_R 矩阵对角元素期望值、均方差和各节点电压稳定可信性指标。

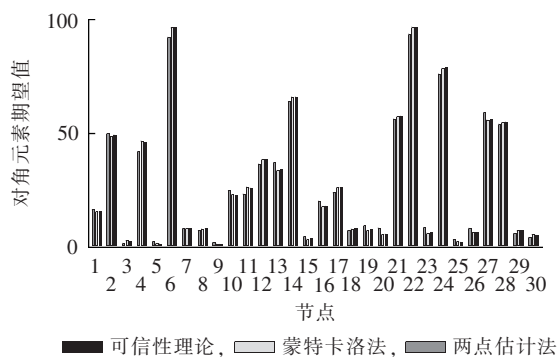
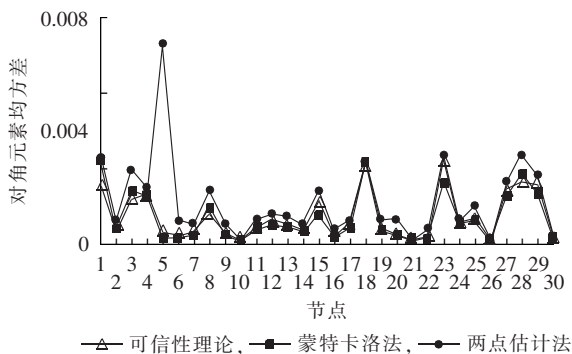
表 6 不同隶属度函数所得 J_R 矩阵对角元素期望值、均方差、电压稳定可信性指标

Table 6 Expectation and mean square error of diagonal elements of J_R matrix for different membership function types, and corresponding voltage stability credibility index

节点	对角元素期望值		对角元素均方差		电压稳定可信性指标	
	三角隶属度函数	梯形隶属度函数	三角隶属度函数	梯形隶属度函数	三角隶属度函数	梯形隶属度函数
1	14.6951	14.6953	0.0021	0.0019	1	1
2	48.5631	48.5625	0.0005	0.0006	1	1
3	1.5749	1.5750	0.0016	0.0017	0.7811	0.7813
4	45.4852	45.4859	0.0018	0.0017	0.9894	0.9893
5	0.5684	0.5683	0.0004	0.0004	1	0.9999
6	96.4582	96.4588	0.0003	0.0004	1	1
7	7.4825	7.4823	0.0004	0.0002	1	1
8	5.4824	5.4823	0.0011	0.0012	1	1
9	0.1568	0.1566	0.0004	0.0003	0.8215	0.8288
10	22.1554	22.1551	0.0001	0.0001	1	1
11	25.4844	25.4856	0.0006	0.0005	1	1
12	37.8452	37.8476	0.0009	0.0009	0.8845	0.8849
13	33.4955	33.4952	0.0007	0.0006	1	1
14	65.7844	65.7849	0.0005	0.0006	0.9915	1
15	2.8473	2.8471	0.0015	0.0012	1	1
16	17.5688	17.5678	0.0003	0.0001	1	1
17	25.5451	25.5450	0.0008	0.0005	1	1
18	7.4825	7.4831	0.0028	0.0032	1	1
19	6.5935	6.5936	0.0006	0.0009	1	1
20	4.8545	4.8549	0.0003	0.0002	1	1
21	56.8574	56.8569	0.0001	0.0001	1	0.9998
22	96.4825	96.4823	0.0002	0.0001	0.9865	0.9866
23	5.6544	5.6543	0.0029	0.0028	1	1
24	78.8854	78.8851	0.0007	0.0009	1	1
25	1.5648	1.5651	0.0009	0.0008	1	1
26	5.5478	5.5473	0.0001	0.0001	1	1
27	55.5447	55.5444	0.0019	0.0021	1	1
28	54.4852	54.4853	0.0022	0.0021	1	1
29	6.4587	6.4589	0.0021	0.0022	0.9881	0.9886
30	4.5495	4.5496	0.0003	0.0005	1	1

其中,连接了等值风机组的节点 3、9、12 的电压稳定可信性指标由于风速的不确定性影响较其他节点略低些,这与 IEEE 14 节点系统的仿真结果相同,与实际运行是吻合的。通过对表 1 和表 6 中的各节点电压稳定可信性指标对比,可以看出随着系统规模的扩大和接入风电场容量的增加,整个系统的电压稳定性得到了提高。从表 6 中可以看出,采用不同的隶属度函数计算所得的对角元素期望值、均方差和电压稳定可信性指标相差很小,所以采用不同隶属度函数对计算结果的影响不大。

为验证本文提出方法的有效性,同样将 IEEE 30 节点系统的仿真结果分别与两点估计法、蒙特卡洛法的结果进行对比。其中,基于可信性理论方法选用三角隶属度函数表征,抽样 90 次;两点估计法采用正态分布表征不确定参数风速的分布;蒙特卡洛法进行 900 次仿真计算。图 6、图 7 分别给出了应用本文方法、两点估计法和蒙特卡洛法进行仿真得到的 J_R 矩

图 6 不同方法所得 J_R 矩阵对角元素期望值Fig.6 Expectation of diagonal elements of J_R matrix for different methods图 7 不同方法所得 J_R 矩阵对角元素均方差Fig.7 Mean square error of diagonal elements of J_R matrix for different methods

阵对角元素特征根期望值、均方差及各节点电压稳定可信性指标的对比结果。

从图 6、7 中可以看出,可信性理论与蒙特卡洛法计算所得的 J_R 矩阵对角元素期望值和均方差都非常接近,而两点估计法计算所得的结果较上述 2 种方法有较大偏差。这与 IEEE 14 节点系统的结果相同,所以认为可信性理论较两点估计法更接近实际结果。

4 结论

本文将可信性理论引入含风电场的电力系统静态电压稳定分析中。采用模糊数来表征不确定参数-风速的变化,提出了基于可信性理论的静态电压稳定分析方法,可以得到收缩后的雅可比矩阵对角元素期望值、均方差和各节点电压稳定可信性指标。最后通过与两点估计法和蒙特卡洛仿真法计算结果的对比,说明了本文方法的有效性和优越性。

参考文献:

[1] 潘文霞. 大型风电场电压稳定性分析与控制研究[D]. 南京: 河海大学, 2004.
PAN Wenxia. Voltage stability analysis and control studies of large-scale wind power plants[D]. Nanjing: Hohai University, 2004.
[2] 李先奇. 变速风电机组风电场并网的系统电压稳定性研究[D].

武汉: 华中科技大学, 2008.

LI Xianqi. Voltage stability study of power system with variable speed wind turbine wind farm[J]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2008.
[3] 赵渊, 周家启, 刘志宏. 大电网可靠性的序贯和非序贯蒙特卡洛仿真的收敛性分析及比较[J]. 电工技术学报, 2009, 24(11): 127-133.
ZHAO Yuan, ZHOU Jiaqi, LIU Zhihong. Convergence analysis and comparison of sequential and nonsequential Monte-Carlo simulation for bulk power system reliability assessment[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(11): 127-133.
[4] 李文沅, 卢继平. 暂态稳定概率评估的蒙特卡罗方法[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(10): 18-23.
LI Wenyuan, LU Jiping. Monte Carlo method for probabilistic transient stability assessment[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(10): 18-23.
[5] 杜文娟, 卜思齐, 王海风. 考虑并网风电随机波动的电力系统小干扰概率稳定性分析[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(增刊): 7-11.
DU Wenjuan, BU Siqi, WANG Haifeng. Effect of stochastic variation of grid-connected wind generation on power system small-signal probabilistic stability[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(Supplement): 7-11.
[6] 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.
[7] 陈凡, 卫志农, 黄正, 等. 考虑风电并网的发电充裕度评估方法的比较[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(6): 30-35.
CHEN Fan, WEI Zhinong, HUANG Zheng, et al. Comparison of adequacy evaluation methods considering grid-connected wind power[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(6): 30-35.
[8] MARCEAU R J, GALIANA F D. Fourier methods for estimating power system stability limits[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1994, 9(2): 764-771.
[9] 王超, 张尧, 武志刚. 改进 LS 方法降维电力系统常微分方程的研究[J]. 电力自动化设备, 2008, 28(5): 26-29.
WANG Chao, ZHANG Yao, WU Zhigang. Improve LS method to reduce differential equation dimensions[J]. Electric Power Automation Equipment, 2008, 28(5): 26-29.
[10] 冯永青, 吴文传, 张伯明, 等. 基于可信性理论的电力系统运行风险评估: (二) 理论基础[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(6): 11-21.
FENG Yongqing, WU Wenchuan, ZHANG Boming, et al. Power system operation risk assessment based on credibility theory: part two theory fundament[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(6): 11-21.
[11] LIU B, LIU Y K. Expected value of fuzzy variable and fuzzy expected value models[J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 2002, 10(4): 445-450.
[12] LIU B. A survey of credibility theory[J]. Fuzzy Optimization and Decision, 2006, 5: 387-408.
[13] LIU Y K, GAO J W. The independence of fuzzy variables with applications to fuzzy random optimization[J]. International Journal of Uncertainty, Fuzziness and Knowledge-Based Systems, 2007, 15

- (Supplement 2):1-20.
- [14] 袁国强,刘晓俊,李春萍. 基于可信性理论的生产计划期望值模型[J]. 数学的实践与认识,2009,39(9):36-43.
YUAN Guoqiang,LIU Xiaojun,LI Chunping. Production planning expected value model based on credibility theory[J]. Mathematics in Practice and Theory,2009,39(9):36-43.
- [15] LIU Y K,LIU B. Expected value operator of random fuzzy variable and random fuzzy expected value model[J]. International Journal of Uncertainty,Fuzziness and Knowledge-Based Systems,2003,11(2):195-215.
- [16] 刘彦奎,王曙明. 模糊随机优化理论[M]. 北京:中国农业大学出版社,2006:25-40.
- [17] 康忠健,辛士郎,仲崇山. 双馈风电场穿透功率增加对电力系统稳定影响综述[J]. 电力自动化设备,2011,31(11):94-99.
KANG Zhongjian,XIN Shilang,ZHONG Chongshan. Impact of ride-through power increase of DFIG-based wind farm on power system stability[J]. Electric Power Automation Equipment,2011,31(11):94-99.
- [18] 李国庆,李小军,彭晓洁. 计及发电报价等影响因素的静态电压稳定分析[J]. 中国电机工程学报,2008,28(22):35-40.
LI Guoqing,LI Xiaojun,PENG Xiaojie. Static voltage stability analysis considering influencing factors such as generation bidding[J]. Proceedings of the CSEE,2008,28(22):35-40.
- [19] 周双喜,朱凌志,郭锡玖,等. 电力系统电压稳定性及其控制[M]. 北京:中国电力出版社,2004:279-281.
- [20] 冯永青,吴文传,张伯明,等. 基于可信性理论的水火电机组检修计划[J]. 中国电机工程学报,2006,26(13):14-19.
FENG Yongqing,WU Wenchuan,ZHANG Boming,et al. Hydro-thermal generator maintenance scheduling based on credibility theory[J]. Proceedings of the CSEE,2006,26(13):14-19.
- [21] 徐遐龄,查晓明,林涛. 基于可信性理论的电力系统小干扰稳定性分析方法[J]. 电力系统自动化,2010,34(12):8-13.
XU Xialing,ZHA Xiaoming,LIN Tao. A credibility theory based method for small signal stability analysis[J]. Automation of Electric Power Systems,2010,34(12):8-13.
- [22] 邢洁,陈陈. 不确定负荷下小干扰稳定的区间分析方法[J]. 电力系统自动化,2009,33(4):6-11.
XING Jie,CHEN Chen. An interval analysis method of small-signal stability considering load uncertainty[J]. Automation of Electric Power Systems,2009,33(4):6-11.

作者简介:



杨悦

杨悦(1985—),女,吉林吉林人,博士研究生,研究方向为新能源电力系统安全性与稳定性分析(E-mail:muzi4876@163.com);

李国庆(1963—),男,吉林吉林人,教授,博士,研究方向为电力系统安全性与稳定性分析、控制与决策、配电系统自动化;

王振浩(1964—),男,吉林吉林人,研究员,研究方向为电力系统安全性与稳定性分析、控制与决策、配电系统自动化。

Probabilistic voltage stability assessment based on credibility theory for power system with wind farm

YANG Yue^{1,2}, LI Guoqing², WANG Zhenhao²

(1. School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China;

2. National-Local Joint Engineering Laboratory for Power System Security Operation and Energy Saving Technology, Northeast Dianli University, Jilin 132012, China)

Abstract: The variation of wind speed influences the voltage stability of power system with large-scale wind power, to which, a method of static voltage stability analysis based on credibility theory is proposed for the fuzzy simulation of wind speed. It not only calculates the expectations and mean square errors of the diagonal elements of the order-reduced Jacobian matrix with uncertain parameters but also determines the static voltage stability indexes based on the credibility theory. The calculated results depend on the actual variation range of uncertain parameter and its membership function type only, the impacts of the statistics of uncertain parameter and the assumption of its distribution function type on the analytic results are thus avoided. The calculated results of the proposed method are compared with those of the two-point probabilistic analysis method and Monte Carlo simulation method, verifying its superiority in the accuracy and calculation load.

Key words: electric power systems; wind power; static voltage stability; credibility theory; fuzzy simulation; probabilistic assessment; stability; membership functions