

含风电场电力系统电压波动的随机潮流计算与分析

别朝红, 刘辉, 李甘, 王锡凡
(西安交通大学电气工程学院, 710049, 西安)

摘要: 提出了用随机潮流计算分析风电场并网所引起的系统电压波动的方法. 该方法全面考虑了风电场出力变化、负荷波动、发电机停运以及线路故障等随机因素, 通过随机潮流计算求出风电场并网后系统各节点电压的概率分布, 其中特别包括风电场接入点的电压波动情况. 在此基础上, 该方法可以对风电场的无功补偿进行进一步分析. 此外还证明了用三参数的 Weibull 分布描述风速变化可以更好地反映高风速对风电机组输出功率的影响, 对于常年风速较高的风电场更适合采用此分布描述. 对接有风电场的 IEEE RTS 24 节点系统进行的算例分析证明了该方法的有效性, 并通过实例说明了如何利用该方法指导对异步风力发电机的无功补偿.

关键词: 风电并网; 电压波动; 随机潮流

中图分类号: TM734 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2008)12-1500-06

Voltage Fluctuation of a Power System with Wind Farms Integrated by Probabilistic Load Flow

BIE Zhaohong, LIU Hui, LI Gan, WANG Xifan
(School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: A new probabilistic load flow model to investigate voltage fluctuation caused by wind farm integration is presented. Considering wind speed randomness and other stochastic disturbances, such as varying loads, generation unit and branch outages, the probabilistic distributions of constraint violation of node voltages and branch transfer powers can be obtained, then the enduring ability of the integration node for the stochastic wind power generation, the reactive power compensation and the integrating equipment effect on the voltage fluctuation can be analyzed thoroughly, which provide a useful tool for electrical engineers to reveal the voltage quality of the grid and choose the integration node for a wind farm. The three-parameter Weibull distribution model taking location parameter into account is proposed to describe wind speed random fluctuation. Compared with the normal two-parameter Weibull distribution model, the impact of the high speed wind on the power output of the wind turbine is considered in the presented model, thus more satisfied results can be obtained in the evaluation. The calculation of voltage fluctuation has been preceded on IEEE RTS 24 test system integrated with wind farms.

Keywords: wind farm integration; voltage fluctuation; probabilistic load flow

大型风电场(容量通常为几十兆瓦)一般与较高电压等级(如 35 kV、110 kV 或更高)的电网相联. 随着风电场规模日益增大, 其出力的随机波动给系

统的调压、调频带了巨大挑战^[1-2]. 目前, 风力发电机多为感应电机, 发出有功功率的同时需要消耗大量无功功率, 这就使系统的电压波动问题更加突出, 但

目前的研究多集中于小型风电场经配网接入系统. 文献[3]研究了风力发电对馈线电压的影响,只考虑了峰荷时段风机零出力和谷荷时段风机满出力的极端情况,没有考虑这些情况对应的概率. 文献[4]基于双母线模型,给出了分布式电源并入系统前后负荷节点电压的变化,但没有给出其所在配电网其他节点的电压分布. 文献[5]考虑了分布式电源接入位置及其出力随机变化,用确定性潮流计算来求配网电压分布. 这种方法的计算量大,也很难全面反映情况. 文献[6]用随机潮流方法研究风电场和太阳能电场的随机出力对配网电压质量的影响,虽较全面反映了系统运行状况,但其所采用随机潮流算法的精度、效率都不够理想.

本文提出了一种用随机潮流计算来分析含风电场的电力系统电压波动的方法. 算例分析结果证明,本文提出的方法可以有效地对系统电压波动进行评估,并对风电场无功补偿设置以及制定发电计划与调度方案提供一定指导.

1 风电场出力随机模型

1.1 风速随机模型

为更准确地描述风速变化,本文采用三参数 Weibull 分布^[7]作为风速模型,三参数 Weibull 分布考虑了位置参数,能够更好地反映高风速对风电机组出力的影响,其概率密度函数为

$$f(v) = \frac{\alpha}{\beta} \left(\frac{v - v_0}{\beta} \right)^{\alpha-1} \exp \left[- \left(\frac{v - v_0}{\beta} \right)^\alpha \right] \quad (1)$$

式中: v 为风速; $\alpha (>0)$ 为形状参数; $\beta (>0)$ 为尺度参数; $v_0 (< v_{\min})$ 为位置参数. 这些参数可以根据风电场当地气象资料进行参数估计来确定,三参数 Weibull 分布和两参数 Weibull 分布的差异见图 1.

1.2 风力发电机模型

目前,风力发电机虽有不同类型,但其出力和风速的关系都基本遵从图 2 所示功率输出曲线.

风力发电机有功出力

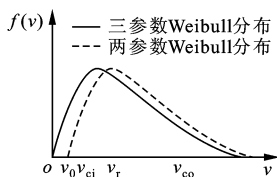


图 1 Weibull 分布的比较

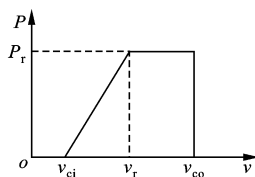
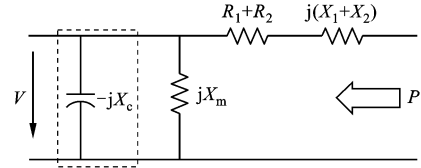


图 2 风力发电机功率风速曲线

$$P_w = \begin{cases} 0 & v \leq v_{ci} \\ k_1 v + k_2 & v_{ci} < v \leq v_r \\ P_r & v_r < v \leq v_{co} \\ 0 & v > v_{co} \end{cases} \quad (2)$$

式中: v_{ci} 是切入风速; v_r 是额定风速; v_{co} 是切出风速; $k_1 = P_r / (v_r - v_{ci})$; $k_2 = -k_1 v_{ci}$.

常见的异步感应风力发电机发出有功功率的同时要吸收大量无功功率,其稳态模型如图 3 所示.



R_1 : 定子电阻; R_2 : 转子电阻; X_1 : 定子电抗; X_2 : 转子电抗;

X_m : 激磁电抗; X_c : 机端并联补偿电容器

图 3 异步风力发电机稳态模型

根据广泛采用的 PQ 模型^[8],异步风力发电机所吸收的无功功率如下

$$Q = - \left(V^2 \frac{X_c - X_m}{X_c X_m} + X \frac{V^2 + 2RP}{2(R^2 + X^2)} - X \frac{((V^2 + 2RP)^2 - 4P^2(R^2 + X^2))^{1/2}}{2(R^2 + X^2)} \right) \quad (3)$$

式中: $X = X_1 + X_2$; $R = R_1 + R_2$.

异步风力发电机吸收的无功功率也可以表示为其有功出力的函数,即

$$Q = -Q_0 - Q_1 P - Q_2 P^2 \quad (4)$$

Q_0 、 Q_1 、 Q_2 经实验获得. 将式(3)进行麦克劳林展开,取前两阶导数并忽略电阻 R ,有

$$Q \approx - \left(V^2 \frac{X_c - X_m}{X_c X_m} + \frac{X}{V^2} P^2 \right) \quad (5)$$

风力发电机除异步发电机外,还有双馈感应发电机和同步感应发电机. 双馈发电机的无功消耗可由控制器补偿,其数值可以保持常数(通常接近于 0). 同步发电机通过功率变换器接入系统,而后者通常配有无功补偿器,其消耗的无功功率也可以视为常数并接近于 0.

1.3 风力发电机出力的概率分布

风力发电机的出力可由风速的概率分布和发电机的功率特性求出.

(1) 当 $v_0 \leq v < v_{ci} \cup v_{co} \leq v$, $P_w = 0$ 时

$$P(p_w = 0) = \int_{v_0}^{v_{ci}} f(v) dv + \int_{v_{co}}^{\infty} f(v) dv = 1 - \exp \left[- \left(\frac{v_{ci} - v_0}{\beta} \right)^\alpha \right] + \exp \left[- \left(\frac{v_{co} - v_0}{\beta} \right)^\alpha \right] \quad (6)$$

(2) 当 $v_{ci} \leq v < v_r, 0 < P_w < P_r$ 时

$$F(p_w) = P(P_w < p_w) = \int_{v_0}^{v_{ci}} f(v) dv + \int_{v_{ci}}^{\frac{p_w - k_2}{k_1}} f(v) dv \quad (7)$$

$$f(p_w) = F'(p_w) =$$

$$\frac{c}{b} \left(\frac{p_w - a}{b} \right)^{c-1} \exp \left[- \left(\frac{p_w - a}{b} \right)^c \right]$$

式中: $a = k_2 + k_1 v_0$; $b = k_1 \beta$; $c = \alpha$.

(3) 当 $v_r \leq v < v_{co}, P_w = P_r$ 时

$$P(P_w = P_r) = \int_{v_r}^{v_{co}} f(v) dv = \exp \left[- \left(\frac{v_r - v_0}{\beta} \right)^\alpha \right] - \exp \left[- \left(\frac{v_{co} - v_0}{\beta} \right)^\alpha \right] \quad (8)$$

为了保证随机潮流计算精度,需将风电场出力的概率分布离散化,其方法如图4所示。

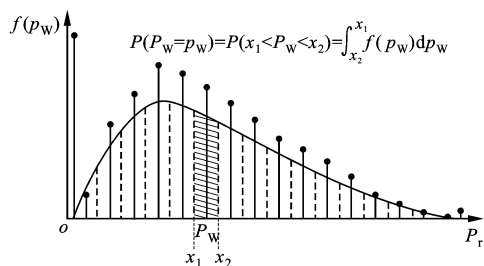


图4 风电场出力概率分布离散化示意图

风电场零出力和额定出力的概率分布计算如上所述,其他点的概率计算如下

$$\begin{aligned} P(P_w = p_w) &= \\ P(x_1 < P_w < x_2) &= \int_{x_1}^{x_2} f(p_w) dp_w = \\ \exp \left[- \left(\frac{x_1 - a}{b} \right)^c \right] &- \exp \left[- \left(\frac{x_2 - a}{b} \right)^c \right] \quad (9) \end{aligned}$$

又根据有功出力和无功功率的关系,可以得到不同有功出力对应的无功功率。因此,风电场出力的概率分布最终可以表示为一组有功出力和无功功率及相应概率的离散数据。

2 考虑风电场的随机潮流计算

2.1 随机潮流算法

本文采用的随机潮流算法^[9]不但考虑了负荷随机波动和发电机随机停运,还计及了线路随机故障。

该算法将负荷波动、发电机停运以及线路故障统一等效为节点注入功率的变化,并以线性化的潮流方程计算它们引起节点电压和支路功率等的变化。对于某些对系统影响较大的离散扰动,如重载线路故障、大容量发电机停运等,线性化潮流方程因误差过大不再适用,此时使用确定性潮流计算系统状

态的变化。

该算法仍假设各随机因素相互独立,先用半不变量法分别计算连续随机因素(主要是正态分布的负荷)和离散随机因素作用下节点电压和支路功率等待求量的半不变量。然后,分别用 Gram-Charlier 级数展开式求待求量连续部分的概率分布,而用 Von Mises 方法求待求离散部分的概率分布。最后,将两部分卷积求出待求变量的概率分布。与一般的随机潮流算法相比,该算法在计算精度和速率都有所提高。

2.2 考虑风电场的随机潮流计算流程

风电场出力变化范围通常较大(从零出力一直到额定功率),其所引起的节点电压和支路功率的变化并不一定在其全部变化范围内符合线性化潮流方程,因此应逐点判断风电场出力的离散概率分布是否适用线性化潮流方程,可以通过设定足够的离散点数以保证计算的精度。考虑风电场的随机潮流计算流程见图5,各步骤的简要说明如下。

(1) 原始数据包括基准状态的潮流数据、风电场出力数据、正态负荷和离散负荷数据、线路故障率、发电机强迫停运率。

(2) 风电场出力概率分布离散化见1.3节。

(3) 用 Newton-Raphson 法计算基本状态潮流,并求出状态量(节点电压)和输出量(支路功率)与节点注入功率的灵敏度关系矩阵 S_0 和 T_0 。

(4) 根据线性化潮流方程,计算连续(正态)负荷波动引起待求变量变化的半不变量。

(5) 求离散分布的风电场出力、随机负荷、发电机随机停运以及线路随机故障对应的状态量和输出量的各阶半不变量时,分别采取线性化潮流方程和确定性潮流两种不同的方法,对扰动的严重程度进行判断。

(6) 按步骤(4)计算出的待求量的各阶半不变量,用 Gram-Charlier 级数展开式求其连续部分的概率,将步骤(5)计算出的待求变量的各阶半不变量转换为各阶矩,用 Von Mises 方法求其离散部分的概率分布。

(7) 将待求变量的离散部分和连续部分的概率分布进行卷积,求出最终的概率分布。

(8) 输出节点电压、支路功率的期望值、方差以及概率分布等结果。

3 算例分析

3.1 算例系统介绍

本文在 IEEE RTS 24 节点系统^[10]中加入风

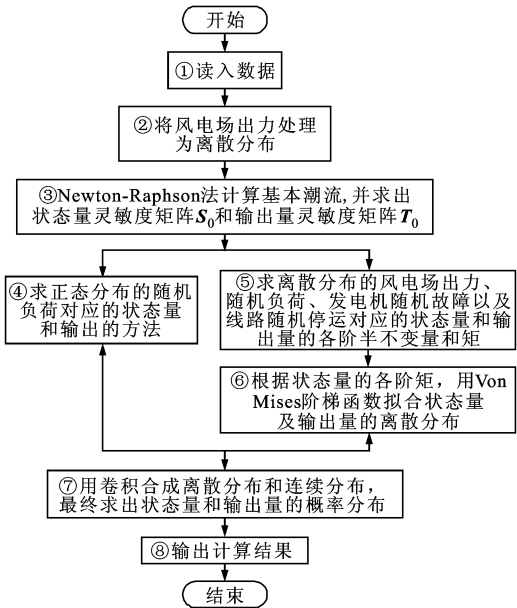


图 5 含风电场的随机潮流计算流程图

电场作为算例。风电机组采用 1 机 1 变的单元接线,变压器型号相同。风电机组发出的电能首先经单元变压器变换到 10 kV,再由电缆线路汇入集电母线,最终由风电场主变压器变换为电网电压送入系统。风电场采用 2 MW 异步风力发电机组,风机参数见表 1。随机潮流计算所需支路、负荷和发电机数据见文献[10]。系统各节点负荷均服从正态分布,均值 μ 取其峰值,标准差 σ 为 0.05μ ,考虑发电机故障、单条线路故障以及并联线路共同模式故障。

3.2 三参数和两参数 Weibull 分布风速模型的比较

三参数 Weibull 分布考虑了位置参数,能够更好地反映高风速对风电机组出力的影响。现通过算例比较说明三参数和两参数 Weibull 分布对考虑风电场的随机潮流计算的影响。

根据我国东南沿海某地风速统计数据,某三参

数 Weibull 分布的参数为 $\alpha=3.97,\beta=10.7,v_0=3$ 。假设相应的两参数 Weibull 分布的参数为 $\alpha=3.97,\beta=10.7$ 。风电场有异步风电机组 35 台,总装机容量为 70 MW,没有无功补偿装置。选择不同接入点分别进行随机潮流计算的结果见表 2。

如表 2 所示,两种风速模型的计算结果差异较大。在一些接入点,由于无功功率、电压支持能力差,电压对风电场出力波动敏感,这种差异更加显著。

三参数 Weibull 分布相当于是两参数 Weibull 分布的概率分布函数沿水平方向平移了 $v_0=3$ (见图 1)。这样,高风速对应的概率增加,相应地使风电机组大出力的概率增加,更好地描述了高风速的变化规律,对于常年风速较高的风电场更适合采用三参数 Weibull 分布风速模型。此外,由于异步风力发电机要消耗大量无功功率而导致电压下降,计算结果表明,三参数 Weibull 分布描述风速变化求出的电压波动要比两参数 Weibull 分布严重得多。这充分说明了考虑 Weibull 分布位置参数 v_0 的重要性。

3.3 无功补偿

异步风力发电机运行时消耗大量的无功功率,对系统的电压质量产生消极影响,所以风电场的无功补偿对风电场并网十分关键。本文所选用的风电机组,单台额定有功出力为 2 MW,消耗无功功率为 0.75 MW。现就额定容量为 164 MW 的大型风电场,单机并联不同容量的电容器分别进行随机潮流计算,以分析电压波动情况,计算结果如表 3、表 4 所示。

可见,风电场无功补偿对系统电压质量的影响巨大,充足的无功补偿可以有效克服风电场并网导致的系统电压波动。系统电压是否合格取决于电压波动最严重的风电场主变低压母线(节点 25)的电压是否合格。如果要求风电场主变低压母线电压偏

表 1 风机参数

叶轮直径/m	叶轮面积/m ²	切入风速/ m·s ⁻¹	额定风速/ m·s ⁻¹	切出风速/ m·s ⁻¹	额定功率/MW	齿轮箱变比	轮毂高度/m
80	5 024	4	15	25	2	100.5	60

表 2 用不同风速模型进行随机潮流计算的结果

电压越限(标幺值< 0.90)概率						
节点号	节点 4 接入		节点 5 接入		节点 8 接入	
	三参数	两参数	三参数	两参数	三参数	两参数
4	0.000 03	0.000 00	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0
24	0.000 01	0.000 01	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0
25	0.633 57	0.269 43	0.005 3	0.005 1	0.446 5	0.165 3

注:没有列出的节点未发生电压越限,下文此类表同。

表 3 不同补偿方式下节点电压越限概率

节点	电压越限(标么值< 0.95)概率				
	无补偿	补偿 200 kV·A	补偿 400 kV·A	补偿 500 kV·A	补偿 750 kV·A
3	0.002 8	0.003 0	0.003 0	0.003 0	0.002 6
4	0.012 4	0.012 1	0.001 9	0.001 9	0.002 0
24	0.004 2	0.004 2	0.004 3	0.004 3	0.004 3
25	0.575 9	0.387 0	0.056 8	0.001 4	0.001 6

表 4 不同补偿方式下节点电压越限概率

节点	电压越限(标么值< 0.90)概率				
	无补偿	补偿 200 kV·A	补偿 400 kV·A	补偿 500 kV·A	补偿 750 kV·A
3	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0
4	0.003 2	0.001 8	0.001 9	0.001 9	0.000 0
24	0.000 6	0.000 1	0.000 0	0.000 0	0.000 0
25	0.211 5	0.001 3	0.001 3	0.001 4	0.000 0

差不得超过-5%~5%，则需单机补偿 500 kV·A 电容量，方能使电压波动超过允许偏差概率达到 0.1%数量级. 如果要求其电压偏差不得超过-10%~10%，则需单机补偿 200 kV·A 电容量，方能使电压波动超过允许偏差概率达到 0.1%数量级. 为更加清晰地表现无功补偿的作用，现给出风电场主变低压母线(节点 25)的电压累积概率分布，见图 6.

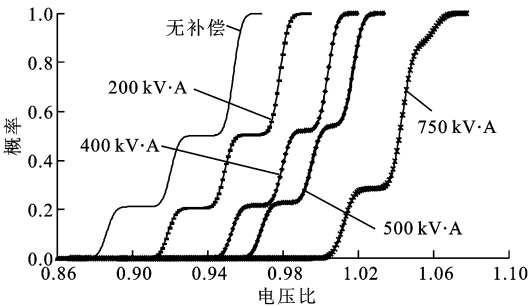


图 6 不同补偿方式下风电场主变低压侧电压累积概率分布

值得注意的是，过度补偿无功会使电压超越上界. 当单机并联 750 kV·A 电容器时，风电场主变低压母线电压偏差超过+5%的概率达到 0.16. 在针对实际风电场选择无功补偿方案时，需要根据系统具体的电压质量标准选择恰当的补偿容量.

3.4 风电场接入点

由于系统各节点在无功率、电压支持与能量传输方面的能力区别巨大，风电场经不同节点接入系统所引起的电压波动也存在巨大差异. 设风电场有异步风电机组 82 台，总装机容量 164 MW，选取不同接入节点进行随机潮流计算，结果见表 5.

本算例除节点 1 是 PV 节点以外，其他都是 PQ 节点. 不考虑 PV 节点发电机无功越界的情况，由于发电机可以向风电场提供足够的无功支持，在不同风速下均能满足风电场的无功需求，因而接入风电场后不存在电压波动问题(见表 5 第 2 列). 如果电压偏差允许范围为 10%~-10%，当风电场分别在其他所选节点接入系统，则会发生电压波动，其中电压波动最严重的是风电场集电母线，其次为风电场接入点. 可见，选择系统中那些无功、电压支持能力较强的节点作为风电场接入节点，能够缓解风电场并网引起的电压波动. 从另一方面讲，在满足一定电压质量标准的前提下，在这样的节点允许接入风电场的规模更大.

3.5 风电场的规模

由表 6 可见，随着风电场规模的增大，电压波动更加严重. 采用异步发电机的大规模风电场运行时消耗大量的无功功率，给系统带来沉重的无功负担，使系统电压质量下降. 几十兆瓦级规模较小的风电场，则无需无功补偿设备，依靠系统的无功、电压支持即可满足电压质量要求. 电压波动以风电场主变低压母线(节点 25)最为严重，其电压累积概率分布如图 7 所示.

由图 7 可见，假设要求风电场主变低压母线电压偏差小于 10%，并且电压越界概率不大于 0.005，那么 164 MW 的风电场电压质量不能达标. 假设要求电压偏差小于 5%，并且电压越界概率不大于 0.005，那么 120 MW 的风电场电压质量不能达标. 因此，对给定电压质量要求，风电场的容量应受到限制. 另外，可由满足电压质量要求的风电场最大容量

表 5 风电场在不同接入点并网引起的电压波动情况

节点	电压越限(标么值<0.95)概率					
	1 节点接入	3 节点接入	4 节点接入	5 节点接入	8 节点接入	9 节点接入
3	0.000 0	0.214 3	0.002 8	0.003 3	0.003 7	0.005 1
4	0.000 0	0.000 0	0.015 6	0.000 0	0.000 0	0.001 9
5	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.001 7	0.000 0	0.000 0
8	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.003 1	0.000 0
9	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0
24	0.000 0	0.005 7	0.004 2	0.004 4	0.004 2	0.004 0
25	0.000 0	0.937 6	0.575 9	0.275 9	0.617 7	0.445 1

表 6 接入不同规模风电场电压波动情况

节点	电压越限(标么值<0.95)概率				
	164 MW	120 MW	80 MW	40 MW	0 MW
3	0.002 9	0.003 6	0.003 6	0.003 5	0.003 4
4	0.012 4	0.007 0	0.001 9	0.000 03	0.000 0
24	0.004 2	0.004 2	0.004 2	0.004 2	0.003 0
25	0.575 9	0.475 7	0.004 4	0.001 4	0.000 0

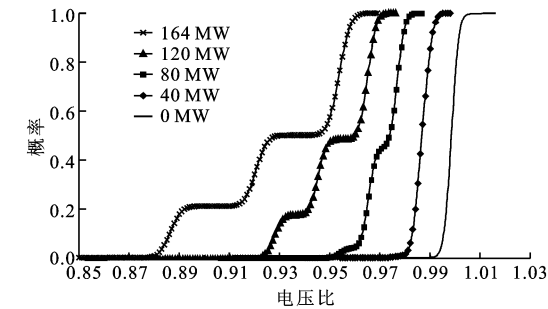


图 7 不同容量风电场主变低压侧电压累计概率分布

确定某一接入节点的风电穿透率极限. 本文的随机潮流计算方法可以评估给定电压质量时风电场穿透率极限.

4 结 论

(1)本文方法全面考虑了风电场出力变化、负荷波动、发电机停运以及线路故障等随机因素,可以有效地对系统电压质量进行评估.

(2)本文方法可以对风电场无功补偿方案进行定量分析,从而为无功补偿优化提供指导.

(3)本文采用三参数 Weibull 分布描述风速,可以更好地反映高风速对风电机组输出功率的影响.

(4)本文方法可以对风电场并网后系统各节点电压、支路功率进行全面分析,从而为风电场并网方案选择提供参考.

参考文献:

[1] 王承煦,张源. 风力发电[M]. 北京:中国电力出版社,2003.
[2] CHOWDHURY H B. Power quality[J]. IEEE Potentials, 2001, 20 (2):5-11.

[3] SMITH J W, BROOKS D L. Voltage impacts of distributed wind generation on rural distribution feeders [C]// 2001 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition. Atlanta, USA: IEEE, 2001:492-497.
[4] CAIRE R, RETIERE N, MARTINO S, et al. Impact assessment of LV distributed generation on MV distribution network[C]//Proceedings of 2002 IEEE Power Engineering Society Summer Meeting. New York, USA:IEEE,2002;1423-1428.
[5] 王志群,朱守真,周双喜. 分布式发电对配电网电压分布的影响[J]. 电力系统自动化,2004,28(16):56-60.
WANG Zhiqun, ZHU Shouzhen, ZHOU Shuangxi. Impacts of distributed generation on distribution system voltage profile[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004,28(16):56-60.
[6] 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.
[7] 胡泽春,王锡凡,张显,等. 考虑线路故障的随机潮流[J]. 中国电机工程学报,2005,25(24):27-33.
HU Zechun, WANG Xifan, ZHANG Xian, et al. Probabilistic load flow method considering branch outages[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(24):27-33.
[8] PLAIT A. The Weibull distribution [J]. Industrial Quality Control, 1962,19(8):17-26.
[9] FEIJOO A E, CIDRAS J. Modeling of wind farms in the load flow analysis[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2000, 15(1):110-115.
[10] GRIGG C, WONG P, ALBRECHT P et al. The IEEE reliability test system 1996 [J]. IEEE Trans on Power Systems,1999,14(3):1010-1020. (编辑 杜秀杰)