

# 含风电场的电力系统概率潮流计算

董雷, 程卫东, 杨以涵

(华北电力大学 电气与电子工程学院, 北京市 昌平区 102206)

## Probabilistic Load Flow Calculation for Power Grid Containing Wind Farms

DONG Lei, CHENG Wei-dong, YANG Yi-han

(School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University,  
Changping District, Beijing 102206, China)

**ABSTRACT:** The power grid containing wind farms is analyzed by AC probabilistic load flow. By use of the approach integrating cumulants and Gram-Charlier series, the DC probabilistic model, is extended into AC probabilistic model, in which a three-parameter weibull distribution is adopted to describe the random variation of wind speed, meanwhile the asynchronous wind turbine generator is treated as PQ node, then a probabilistic model of wind turbine generator is built. Based on the built model the calculation of IEEE 30-bus system is carried out, and then the probabilistic distributions of nodal voltages as well as the probabilistic distribution of branch load flow are obtained. The variation of nodal voltages and branch load flow before and after the connection of wind farms with power grid is compared and analyzed.

**KEY WORDS:** probabilistic load flow; wind farms; cumulant; Gram-Charlier series

**摘要:** 用交流概率潮流方法对含有风电场的电力系统进行了分析。采用结合累积量和 Gram-Charlier 级数的方法, 将直流概率模型拓展为交流概率模型, 采用 3 参数的 weibull 分布来描述风速的随机变化, 同时将异步风机处理为 PQ 节点, 建立了风力发电机组的概率模型, 基于风电模型对 IEEE-30 节点系统进行计算, 得到了各节点电压的概率分布和各支路潮流的概率分布, 分析比较了风电场加入前后电力系统的节点电压和支路潮流变化情况。

**关键词:** 概率潮流; 风电场; 累积量; Gram-Charlier 级数

## 0 引言

风能具有天然波动性, 因此风电机组出力具有随机性、间歇性和不可控性。从电网的角度看, 并网运行的风电机组相当于一个具有随机性的扰动源, 它们的接入除了会产生电压稳定问题和电能质量问题(如电压波动、闪变、谐波污染等)外, 还会

改变电网原有的潮流分布以及线路的传输功率。随着风电在电力系统中所占比例的扩大, 其对电网的影响<sup>[1-2]</sup>也越来越明显, 研究风电接入电网后对系统运行的影响具有重要意义。

目前大多数的研究都是用确定性的方法来计算含风电场电力系统的潮流情况, 文献[3-4]建立了风电场的稳态分析模型, 并用简化的模型进行潮流计算。文献[5]根据风电场有功功率及节点电压动态修改无功功率, 进行联合迭代以计算系统潮流, 但也没有考虑风能的随机性。文献[6]用随机潮流方法<sup>[7-15]</sup>研究风电场和太阳能电场的随机出力对配电网电压质量的影响, 虽较全面反映了系统运行状况, 但对风电接入后系统支路潮流分布及变化情况未作分析。文献[7]用蒙特卡罗模拟法来进行含风电场的随机潮流计算, 需要进行多次模拟, 计算时间长。

本文采用结合累积量和 Gram-Charlier 级数展开理论<sup>[12-13]</sup>的交流概率潮流方法, 考虑风电机组的概率模型<sup>[14-16]</sup>, 对含有风电场的电力系统进行了概率潮流计算, 得到了各节点电压的概率分布和各支路潮流的概率分布, 分析了风电场接入对系统的影响。

## 1 风电场概率模型

### 1.1 风速的概率模型

对风速的大量实测数据表明, 绝大多数地区的年平均风速分布都符合 weibull 分布, 则风速的概率密度函数可由下式描述:

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

式中:  $v$  为风速;  $k$ 、 $c$  以及  $v_0$  为 weibull 分布的 3 个参数, 其中  $k$  为形状参数,  $c$  为尺度参数,  $v_0$  为位置参数。

## 1.2 风力发电机的概率模型

图 1 所示为风力发电机功率输出曲线, 它描述了风力发电机输出功率随风速变化的特性。

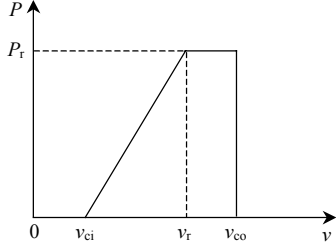


图 1 风力发电机功率输出曲线  
Fig. 1 Active power output curve of wind farm generator

根据图 1, 风力发电机输出功率表达式为

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

式中:  $k_1 = P_r / (v_r - v_{ci})$ ;  $k_2 = -k_1 v_{ci}$ ;  $P_r$  为风力发电机的额定功率;  $v_r$  为额定风速;  $v_{ci}$  为切入风速;  $v_{co}$  为切出风速。

## 1.3 风力发电机的有功概率分布

在实际中, 风速在大部分时间内都介于切入风速和额定风速之间, 即风速和输出有功满足线性关系, 则根据式(1)(2)可求出风力发电机有功输出的概率分布:

$$F(p_w) = \int_{v_0}^{v_{ci}} f(v) dv + \int_{v_{ci}}^{\frac{p_w - k_2}{k_1}} f(v) dv \quad (3)$$

式(3)的导数为

$$f(p_w) = F'(p_w) = \exp\left[-\left(\frac{p_w - k_1 v_0 - k_2}{k_1 c}\right)^k\right] \frac{k}{k_1 c} \cdot \left(\frac{p_w - k_1 v_0 - k_2}{k_1 c}\right)^{k-1} \quad (4)$$

## 1.4 风力发电机的无功概率分布

目前在我国的大型风电场中, 采用较多的是异步发电机, 它在发出有功功率的同时还要从系统吸收无功功率, 以提供其建立磁场所需的励磁电流。风力发电机可简化处理为 PQ 节点, 假定通过风电机组中电容器的自动投切, 可使功率因数恒定不变, 则风力发电机吸收的无功功率  $q_w$  可表示为

$$q_w = p_w \tan \alpha \quad (5)$$

式中  $\alpha$  为功率因数角。

根据式(4)(5)得到风力发电机吸收的无功输出的概率分布为

$$f(q_w) = \exp\left[-\left(\frac{p_w - k_1 v_0 - k_2}{k_1 c}\right)^k\right] \frac{k}{k_1 c} \cdot \left(\frac{p_w - k_1 v_0 - k_2}{k_1 c}\right)^{k-1} \tan \alpha \quad (6)$$

## 2 交流概率潮流计算模型

### 2.1 概述

概率潮流能反映电力系统中各种因素随机变化对系统运行的影响, 它可综合考虑电力系统网络拓扑结构、元件的参数、节点负荷值、发电机出力等变量变化的不确定情况<sup>[13]</sup>, 同时也可以分析考虑由于风速的波动造成的风力发电机出力的随机性, 这有助于发现电网中的薄弱环节, 为规划和调度部门的决策提供有价值的信息。

文献[13]给出了基于直流模型的概率潮流计算方法, 该方法在规划阶段对电力系统进行概率分析是快捷有效的, 但不能分析系统运行时的电压信息。本文在此基础上建立了交流概率潮流模型, 给出了含风电场的电力系统电压及支路潮流分布情况。

### 2.2 线性化的潮流模型

概率潮流计算模型的功率方程矩阵形式为

$$\begin{cases} \mathbf{w} = \mathbf{f}(\mathbf{x}) \\ \mathbf{z} = \mathbf{g}(\mathbf{x}) \end{cases} \quad (7)$$

式中: 节点注入量  $\mathbf{w}$  为随机变量;  $\mathbf{x}$  为节点电压变量;  $\mathbf{f}$  为功率方程;  $\mathbf{z}$  为支路潮流随机变量;  $\mathbf{g}$  为支路潮流方程。

将式(7)在基准运行点处利用泰勒级数展开并忽略 2 次以上的高次项, 可得到

$$\begin{cases} \Delta \mathbf{w} = \mathbf{J}_0 \Delta \mathbf{x} \\ \Delta \mathbf{z} = \mathbf{G}_0 \Delta \mathbf{x} \end{cases} \quad (8)$$

式(8)也可以表示为

$$\begin{cases} \Delta \mathbf{x} = \mathbf{J}_0^{-1} \Delta \mathbf{w} = \mathbf{S}_0 \Delta \mathbf{w} \\ \Delta \mathbf{z} = \mathbf{G}_0 \mathbf{J}_0^{-1} \Delta \mathbf{w} = \mathbf{T}_0 \Delta \mathbf{w} \end{cases} \quad (9)$$

式中:  $\Delta \mathbf{x}$  为对应于随机扰动  $\Delta \mathbf{w}$  的随机响应;  $\mathbf{J}_0$  为潮流计算最后一次迭代的雅可比矩阵;  $\mathbf{S}_0$  为灵敏度矩阵;  $\mathbf{G}_0 = \left. \frac{\partial \mathbf{g}(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}} \right|_{\mathbf{x}=\mathbf{x}_0}$ 。

### 2.3 半不变量和 Gram-Charlier 级数

本文的概率潮流计算采用结合半不变量和 Gram-Charlier 级数展开的方法<sup>[3]</sup>, 将求取几个随机变量和的概率密度函数时的卷积和反卷积计算简化为几个半不变量的代数运算, 减少了计算量。同时, 利用 Gram-Charlier 级数展开, 经过一次计算就

可以得到所求状态变量的概率密度函数 (probabilistic density function, PDF) 和累积分布函数 (cumulative distribution function, CDF), 与传统的蒙特卡罗法相比, 它缩短了计算时间。

### 3 含风电场的电力系统概率潮流计算流程

含风电场系统概率潮流计算流程如图 2 所示。

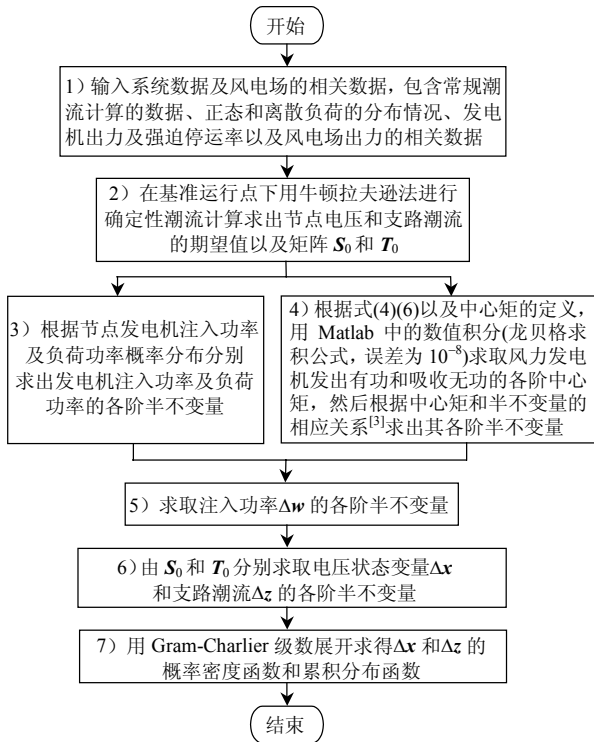


图 2 含风电场的电力系统概率潮流计算流程

Fig. 2 The calculation flow chart of probabilistic load flow in electrical power system containing wind farms

### 4 算例结果与分析

#### 4.1 2 种方法的比较与分析

采用本文交流概率潮流方法对图 3 的 IEEE-30 节点系统进行仿真计算, 并与采用蒙特卡罗法 (Monte Carlo simulation, MCS) 得到的结果进行比较

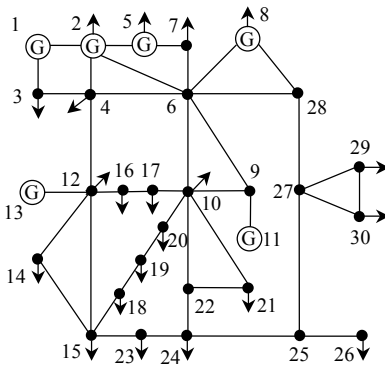


图 3 IEEE-30 节点系统

Fig. 3 IEEE-30 bus system

较, 以验证本文方法的准确性。计算的假设条件如下: 各随机变量相互独立; 负荷服从正态随机变量分布; 发电机的出力服从 0-1 分布。

进行 Gram-Charlier 级数展开时<sup>[12]</sup>, 取前 8 阶就能使该级数的截断误差控制在可接受范围内, 因此本文的 Gram-Charlier 级数也取前 8 项。设蒙特卡罗仿真次数为 5000, 采用 Matlab7.1, 根据图 2(除去步骤 4 即可) 编制程序, 得到的节点电压 CDF 曲线和支路有功功率 CDF 曲线分别如图 4、5 所示。

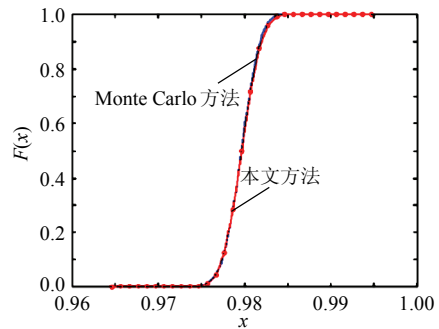


图 4 节点 27 电压幅值的 CDF 曲线比较

Fig. 4 Comparison of CDF voltage at node 27

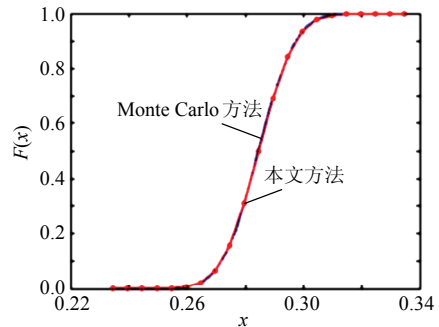


图 5 支路 6-9 有功功率的 CDF 曲线比较

Fig. 5 Comparison of CDF active power flow of line 6-9

通过对所有 PQ 节点电压幅值的 CDF 曲线及所有支路的有功功率 CDF 曲线进行比较, 并采用文献[12]中定义的方差和的根均值(average root mean square, ARMS)来度量 2 种方法的差值, 计算得到最大的 ARMS 如表 1 所示。将迭代 5000 次的蒙特卡罗方法的结果作为参考值, 通过对比计算得到节点 23 的电压幅值的 ARMS 最大, 为 0.086%; 支路 10-21 的有功功率的 ARMS 最大, 为 0.093%。该值所代表的误差在实际规划中可以接受, 说明本文的方法是准确的。

另外, 采用本文方法时, 所需的计算时间为表 1 ARMS 的最大值

Tab. 1 The maximum value of ARMS

求解量	ARMS 的最大误差/%	最大误差所在处
节点电压幅值	0.086	节点 23
支路有功功率	0.093	支路 10-21

0.688 0 s，采用蒙特卡罗方法得到的计算时间为 176.843 0 s，本文方法的计算时间明显小于蒙特卡罗方法的计算时间。

### 4.2 计及风电场随机性的仿真结果与分析

#### 4.2.1 仿真参数

在 4.1 节的基础上，风电场通过变压器和 110 kV 线路接入图 3 的节点 29，如图 6 所示。风电场接入系统的线路参数为  $(12.6+j24.96)\Omega$ 。风电场容量为  $10\times 2$  MW，电场中风电机组分为 2 排，排间距为 120 m，轮毂处的高度为 50 m，假定风电场空气密度为  $1.224 5\text{ kg/m}^3$ ，风力机的扫掠面积为  $1 840\text{ m}^2$ ，风电机组的切入风速、切出风速、额定风速均相同，分别为 4 m/s、15 m/s、25 m/s，额定电压为 690 V，异步风力发电机的定子阻抗为  $0.004 53+j0.050 7\Omega$ ，转子的阻抗为  $0.004 86+j0.149 1\Omega$ ，激磁电抗为  $2.205 9\Omega$ 。风速的 weibull 分布的 3 参数如下： $v_0=3$ ； $k=3.97$ ； $c=10.7$ 。运用 Matlab7.1 编制程序对该系统进行仿真计算。

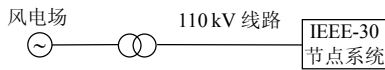


图 6 风电场接入的 IEEE-30 节点系统

Fig. 6 IEEE-30 bus system with wind farm connected

#### 4.2.2 节点电压变化情况

通过在图 3 的节点 29 接入该风电场，可对接入前后的系统电压情况进行比较。由于各节点的无功补偿情况、电压支持能力以及与风电场接入点的物理距离不尽相同，各个节点的过电压，欠电压以及电压波动情况也不同。一些节点的电压累积分布曲线(CDF)比较结果如图 7 所示。

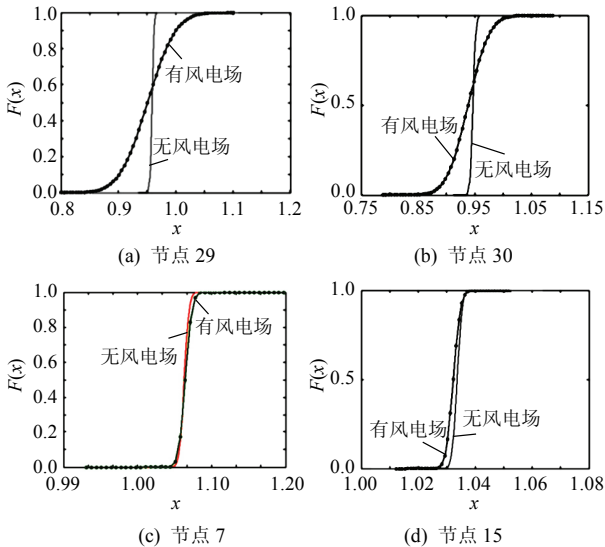


图 7 节点电压 CDF 曲线比较

Fig. 7 CDF comparison of the voltage at some nodes

图 7 中节点 29 是风电场接入点，节点 30 是与节点 29 直接相连的节点，节点 7 和 15 是离节点 29 较远的节点。与接入前的系统相比，节点 29 及 30 的电压波动情况最明显。就节点 29 而言，其电压越上限的概率为 7.68%，电压越下限的概率为 9.32%，而离接入点较远的节点 15 的电压越上限概率为 0，越下限概率为 0.032%。

从图 7 可看出，风力发电的随机性使节点电压的波动增大，电压的越限概率明显变大，且离风电场接入点越近，影响越明显，这就需要对风电场接入点及与其直接相连的节点给予相应的无功补偿。

#### 4.2.3 支路潮流变化情况

同样的，在节点 29 接入风电场，支路潮流的变化情况如图 8 所示。

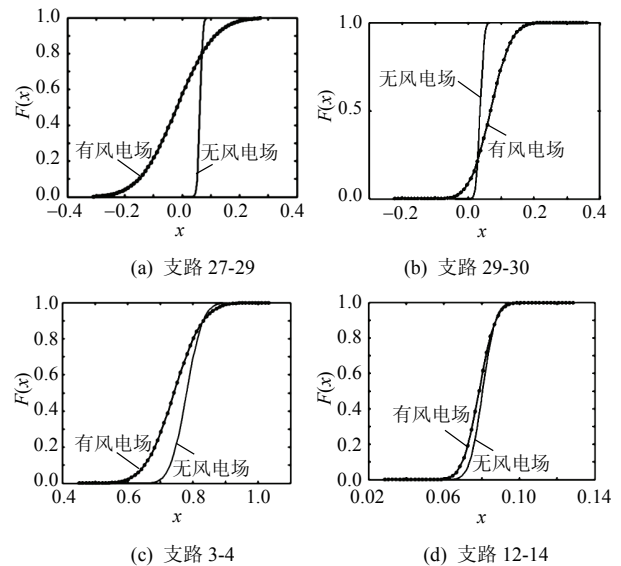


图 8 支路有功功率 CDF 曲线比较

Fig. 8 CDF comparison of active power flow of some lines

从图 8 可以看出，风电场的接入影响了原有系统的支路潮流情况，甚至改变了原有支路潮流的流向。如支路 27-29，在未接入风电场前，潮流方向是节点 27 流向节点 29，而接入后，潮流由节点 29 流向节点 27，且支路潮流的波动情况比未接入风电场前更严重，其潮流过载概率由 0 增大到 7.51%；相比之下，支路 29-30 也连接着风电场，虽然潮流流向未改变，但其线路上流过的有功功率变化范围增大，潮流过载的概率也由原来的 0 增大到 1.3%。

图 8 还给出了离风电场接入点较远的支路 3-4 和支路 12-14 的有功变化情况。支路 12-14 的有功 CDF 曲线受风电场的影响较小，而支路 3-4 的有功 CDF 受风电场的影响较大，这与系统原有的潮流水平有关。未接入风电场前，支路 12-14 的潮流较轻，

与风电场接入点的电气联系较小,受其影响较小,而支路3-4的潮流较重,受风电场影响较大。

通过上述比较可知,接入风电场后,系统不同支路的有功潮流受到的影响不同,离风电场接入点越近,原有潮流越重,其支路有功潮流波动情况愈严重,即受到风电功率的冲击越大;而离风电场接入点越远,原有的潮流越轻,其支路有功潮流受风电功率的影响越小。

## 5 结论

1) 风力发电的随机性使得节点电压的波动增大,节点电压的越限概率随之变大,且影响程度与它们之间的距离有关,离风电场接入点越近,影响越明显。

2) 风电场的接入对系统支路潮流影响较大,其不仅增加了支路潮流的过载概率,而且可能改变原有支路潮流的流向。其受风电场的影响程度和它们与风电场接入点的距离及原有潮流的情况有关。

3) 本文综合考虑了负荷的随机波动、发电机的随机停运以及风电场出力的随机性,用结合累积量和 Gram-Charlier 级数展开方法对接入风电场的系统进行了交流概率潮流分析,只需通过1次计算就能得到各节点的越限概率以及各支路潮流的过载概率,大大缩短了计算时间,能为含风电场的电力系统规划运行人员提供更全面有用的信息。

## 参考文献

- [1] 王志群,朱守真,周双喜,等. 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 Shouzheng, Zhou Shuangxi, et al. Impacts of distributed generation on distribution system voltage profile [J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(16): 56-60(in Chinese).
- [2] Abouzahr I, Ramakumar R. An approach to assess the performance of utility-interactive wind electric conversion systems [J]. IEEE Trans on Energy Conversion, 1991, 6(4): 627-638.
- [3] 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.
- [4] 吴义纯,丁明,张立军. 含风电场的电力系统潮流计算[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(4): 36-39.  
Wu Yichun, Ding Ming, Zhang Lijun. Power flow analysis in electrical power networks including wind farms[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(4): 36-39(in Chinese).
- [5] 江岳文,陈冲,温步瀛. 含风电场电力系统的潮流计算[J]. 华东电力, 2008, 36(2): 86-88.  
Jiang Yuewen, Chen Chong, Wen Buying. Power flow calculation for power systems including wind farms[J]. East China Electric Power, 2008, 36(2): 86-88(in Chinese).
- [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): 15-19.  
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): 15-19(in Chinese).
- [7] 郑睿敏,李建华,李作红,等. 考虑尾流效应的风电场建模以及随机潮流计算[J]. 西安交通大学学报, 2008, 42(12): 1515-1520.  
Zheng Ruimin, Li Jianhua, Li Zuohong, et al. Modeling of large-scale wind farms in the probabilistic power flow analysis considering wake effects[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2008, 42(12): 1515-1520(in Chinese).
- [8] Borkowska B. Probabilistic load flow[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1974, 93(4): 752-759.
- [9] Allan R N. Probabilistic techniques in AC load flow analysis [J]. Proceedings of IEEE, 1977, 124(2): 154-160.
- [10] 王锡凡,王秀丽. 电力系统随机潮流分析[J]. 西安交通大学学报, 1988, 22(2): 87-97.  
Wang Xifan, Wang Xiuli. Probabilistic load flow analysis in power systems[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 1988, 22(2): 87-97(in Chinese).
- [11] Leite da Silva A M, Arienti V L. Probabilistic load flow by a multilinear simulation algorithm[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1990, 37(4): 276-282.
- [12] Zhang Pei, Stephen T L. Probabilistic load flow computation using the method of combined cumulants and gram-charlier expansion[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2004, 19(1): 676-682.
- [13] Lei Dong, Zhang Chuancheng, Zhang Pei. Improvement of probabilistic load flow to consider network configuration uncertainties [J]. Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference, 2009.
- [14] 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(in Chinese).
- [15] Bie Zhaohong, Li Gan, Liu Hui, et al. Studies on voltage fluctuation in the integration of wind power plants using probabilistic load flow[C]. IEEE Power and Energy Society General Meeting, Pittsburgh, USA, 2008.
- [16] 邢文琦,晁勤. 含不同风电机组的风电电网仿真研究[J]. 电网技术, 2009, 33(7): 99-102.  
Xing Wenqi, Chao Qin. Simulation study on wind power system containing various wind turbine generators[J]. Power System Technology, 2009, 33(7): 99-102(in Chinese).



董雷

收稿日期: 2009-04-14。

作者简介:

董雷(1967—),女,博士研究生,副教授,研究方向为电力系统分析、运行与控制;

程卫东(1985—),男,硕士研究生,研究方向为电力系统分析、运行与控制, E-mail: chengweidong543@126.com;

杨以涵(1927—),男,教授,博士生导师,主要研究方向为电力系统分析、运行与控制。

(责任编辑 杜宁)