

一种用于含风电场电力系统电压稳定概率分析的混合方法

周玮¹, 彭昱¹, 孙辉¹, 吴敬坤², 樊飞²

(1.大连理工大学电气工程系, 辽宁 大连 116024; 2.东北电力设计院系统规划室, 吉林 长春 130021)

摘要: 为了进行风电并网后电力系统电压稳定性的评估, 利用具有概率特征的负荷裕度指标, 提出了一种含风电场电力系统电压稳定概率分析的混合方法。当系统随机参数扰动量很小时将系统简化为线性化模型, 根据线性方程的叠加性原理, 在计算负荷裕度关于随机参数的灵敏度矩阵的基础上运用叠加性原理并结合正态分布的特性, 将系统负荷裕度在期望值附近的随机扰动分解为单独考虑负荷随机变化和风速随机变化两种情况下求得的负荷裕度扰动量之和。该方法与 Monte Carlo 法和半不变量法同时在 IBBE-30 节点系统上进行仿真计算, 通过对比分析表明了本文方法在保证准确性的基础上节省了计算时间。

关键词: 风电; 电压稳定; 负荷裕度; 叠加原理; 灵敏度; 半不变量

A mixed method for voltage stability probabilistic analysis of power systems containing wind energy

ZHOU Wei¹, PENG Yu¹, SUN Hui¹, WU Jing-kun², FAN Fei²

(1. Department of Electrical and Electronic Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;

2. Northeast Electric Power Design Institute, Changchun 130021, China)

Abstract: In order to assess the voltage stability as wind power is integrated into the power system, a method is proposed to analyze probability characteristics of voltage stability based on probabilistic loading margin index. The deviations of these random parameters are small such that linear approximation of loading margin with respect to these parameters is valid. After calculating the sensitivity matrix of loading margin with respect to random parameters, superposition principle is applied to separate the loading margin deviation which varies around the expectation into two parts: load random parameters and wind random parameters respectively. The simulation results of the proposed method compared with those obtained from Monte Carlo method and moment and cumulate method for IEEE-30 test system show that the proposed method is not only precise but also simple and fast.

Key words: wind power; voltage stability; loading margin; superposition principle; sensitivity; semi-invariant

中图分类号: TM712 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2008)02-0026-05

0 引言

为了防止电压崩溃事故, 电力系统调度人员最关心的是当前运行状态下系统电压稳定性及稳定裕度^[1,2]。然而电力系统中的一些参数由于测量、估计或预测上的误差具有一定的随机性, 基于确定的系统运行方式和恒定的网络参数的分析方法, 如连续潮流法, 计算结果往往偏于乐观。特别是风电并网以后, 由于风速的随机性和波动性难以预测, 这势必给电力系统的电压稳定性带来影响。因此, 计及系统参数随机性进行电压稳定分析可为系统的调度运行提供参考, 具有十分重要的研究价值。

Heydt G T和Burchett R C最早将概率方法引入到电力系统稳定分析中^[3]。其基本思想是: 假设随

机变量服从正态分布, 利用线性化系统模型, 从系统参数的概率特性计算出电压稳定负荷裕度的均值和方差。文[4]采用高阶原点矩的方法将该算法扩展到可以包含任意分布的随机变量的情况。除此之外, 电压稳定的概率分析方法还包括半不变量法^[5,6], 点估计法^[7]和Monte Carlo法^[8]等。Monte Carlo法为确保计算结果的准确性需要大量的反复运算, 计算时间很长。点估计法通过运行两倍随机参数个数的潮流程序计算所求参数的各阶矩, 虽然与Monte Carlo法相比计算时间明显减少, 但同样无法保证其快速性。文献[9]利用半不变量的方法求解负荷随机扰动后系统电压失稳的概率问题, 计算效率很高, 但需要遵循参数之间相互独立的假设前提。文[10]采用2阶灵敏度法、多项式曲线拟合法及神经元网络学习

法提高了计算精度。

本文提出了一种基于叠加原理和半不变量求取含风场电力系统负荷裕度概率分布的方法。通过含参数潮流方程建立了线性化模型。在半不变量方法和叠加原理的基础上, 针对负荷参数符合正态分布的特点, 根据灵敏度矩阵^[11]和协方差矩阵直接计算负荷裕度的均值和方差, 可避免计算所有服从正态分布参数的半不变量, 同时可计及负荷参数之间的相关性。最后将两个结果叠加并进行 Edge worth 级数展开就能得到负荷裕度的分布, 并在此基础上计算非正常运行状态下的系统失稳概率, 从而可以更准确合理地评估电力系统的电压安全状态。对 IEEE-30 节点系统分别采用 Monte Carlo 法、半不变量法和本文方法进行计算, 通过对比分析, 表明了本文方法不仅可以保证计算结果的准确性, 而且简化了计算过程, 在计算速度上也具有明显的优势。

1 线性化系统模型

为了计算风速和负荷随机性对电压稳定负荷裕度的影响程度, 参数化后的潮流方程在崩溃点处可表达为:

$$f(x, \lambda, p) = 0 \quad (1)$$

其中: x 为状态变量, λ 为崩溃点处的负荷变化因子, p 为具有随机性的系统参数

$$p = \begin{bmatrix} v \\ P_{i0} \\ Q_{i0} \\ K_G \\ K_{P_i} \\ K_{Q_i} \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中: v 为风电场风速, P_{i0} 为连续潮流初始点负荷有功功率向量, Q_{i0} 为初始点负荷无功功率向量, K_G 为发电机有功功率增长系数向量, K_{P_i} 为负荷有功功率增长系数向量, K_{Q_i} 为负荷无功功率增长系数向量。

电力系统是一个典型的、复杂的非线性系统, 系统模型的阶数一般很高, 系统计算量庞大。当系统运行参数的扰动量很小时, 为简化计算, 可将其进行线性化, 将式 (1) 在临界点处进行一阶 Taylor 展开^[16], 这里临界点是通过连续潮流算法计算得到的, 各参数的初值取其期望值。

$$\begin{bmatrix} f_x & f_\lambda & f_p \end{bmatrix}_* \times \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta \lambda_* \\ \Delta p \end{bmatrix} = 0 \quad (3)$$

其中: $f_x|_*$ 即 J_* 为潮流计算中崩溃点处的雅可比矩阵。

为了表示系统临界点与当前运行点之间的相对距离, 采用负荷裕度百分数来代替负荷裕度的计算, 同时满足了系统进行风险评估^[17]时计算严重性函数的需要。

负荷裕度为

$$\text{margin} = \sum_i P_i - \sum_i P_{i0}|_* = \lambda_* \sum_i (K_{P_{i0}} P_{i0}) \quad (4)$$

负荷裕度百分数为

$$L = \text{margin}\% = \frac{\text{margin}}{\sum_i P_{i0}} = \frac{\lambda_* \sum_i (K_{P_{i0}} P_{i0})}{\sum_i P_{i0}} \quad (5)$$

$$\text{令 } F(\lambda_*, L, p) = \frac{\lambda_* \sum_i (K_{P_{i0}} P_{i0})}{\sum_i P_{i0}} - L = 0 \quad (6)$$

在崩溃点处进行一阶 Taylor 展开, 得到

$$\begin{bmatrix} F_\lambda & -1 & F_p \end{bmatrix}_* \times \begin{bmatrix} \Delta \lambda_* \\ \Delta L \\ \Delta p \end{bmatrix} = 0 \quad (7)$$

$$L = E(L) + \Delta L \quad (8)$$

其中: Δp 为随机参数的扰动量; ΔL 为因 Δp 而引起的负荷裕度百分数的随机扰动。

由式 (3) 和 (7), 此时系统建立了线性模型, 叠加原理成立。本文在半不变量方法的基础上, 运用叠加原理将 ΔL 分解为单独考虑服从韦伯分布的风速随机扰动和服从正态分布的负荷参数随机扰动两种情况求得的负荷裕度百分数扰动量进行叠加。

$$\Delta L = \Delta L_{\text{wind}} + \Delta L_{\text{load}} \quad (9)$$

对于只考虑风速随机分布的情况, 采用半不变量方法计算, 对于只考虑负荷参数随机分布的情况, 因其服从正态分布, 则利用负荷裕度百分数灵敏度矩阵和系统参数的概率特性计算出电压稳定负荷裕度的均值和方差。这样就避免了计算所有负荷参数的半不变量, 从而简化了计算过程, 节省了计算时间。

2 基于叠加原理和半不变量混合方法的负荷裕度概率分析

2.1 风力发电机模型

风力发电机分为恒速恒频和变速恒频两种系统运行方式,二者对应风机输出功率模型在潮流计算中也有所不同^[14, 15]。随着电力电子元件的性价比不断提高,采用双馈电机等新型发电机组是大势所趋。

本文在进行电压稳定计算时选用双馈风力发电机模型,恒功率控制方式,风机发出的有功功率为

$$P_{\text{wind}} = \begin{cases} 0 & 0 \leq v < v_i \\ a + bv^3 & v_i \leq v < v_r \\ P_r & v_r \leq v \leq v_0 \\ 0 & v > v_0 \end{cases} \quad (10)$$

其中:

$$a = \frac{P_r v_i^3}{v_i^3 - v_r^3} \quad b = \frac{P_r}{v_r^3 - v_i^3}$$

v 为风速, v_i 为风机切入风速, v_r 为额定风速, v_0 为风机切出风速, P_r 为风机额定输出功率。

风场总的输出有功功率为

$$P_{\text{farm}} = P_{\text{wind}} \times N \quad (11)$$

其中: N 为风电场中风机的个数。

风电场总的输出无功功率为

$$Q_{\text{farm}} = \frac{P_{\text{farm}}}{\cos \varphi} \sqrt{1 - \cos^2 \varphi} \quad (12)$$

其中: $\cos \varphi$ 为功率因数。

另外,风速符合韦伯分布,其概率密度函数为

$$f(v) = \left(\frac{k}{c}\right) \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k} \quad (13)$$

其中: v 为风速, k 为形状参数, c 为尺度参数。

2.2 负荷裕度百分数灵敏度矩阵的求取

当系统进行线性化后,式(3)中 $f_x|_*$ 即 J_* 为潮流计算中崩溃点处的雅可比矩阵,也是一奇异矩阵,因此存在 0 特征值对应的左特征向量 ω_* , 满足

$$\omega_* f_x|_* = 0 \quad (14)$$

ω_* 左乘式(3)得到

$$\omega_* f_\lambda|_* \Delta \lambda_* = -\omega_* f_p|_* \Delta p \quad (15)$$

$$\Delta \lambda_* = -\frac{\omega_* f_p|_*}{\omega_* f_\lambda|_*} \Delta p = \lambda_p \Delta p \quad (16)$$

$$\lambda_p = -\frac{\omega_* f_p|_*}{\omega_* f_\lambda|_*} \quad (17)$$

$$\text{由式(7)} \quad \Delta L = F_\lambda|_* \Delta \lambda_* + F_p|_* \Delta p \quad (18)$$

λ_p 即为负荷变化因子 λ 关于参数 p 的灵敏度矩阵。

将式(16)代入上式中,可得

$$\Delta L = (F_p|_* - F_\lambda|_* \frac{\omega_* f_p|_*}{\omega_* f_\lambda|_*}) \Delta p \quad (19)$$

其中: Δp 为随机参数的扰动量, ΔL 为因 Δp 而引起的负荷裕度百分数的随机扰动。

$$L_p = F_p|_* - F_\lambda|_* \frac{\omega_* f_p|_*}{\omega_* f_\lambda|_*} \quad (20)$$

$$\Delta L_{\text{wind}} = L_p \times \begin{bmatrix} \Delta v \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (21)$$

$$\Delta L_{\text{load}} = L_p \times \begin{bmatrix} 0 \\ \Delta P_{l0} \\ \Delta Q_{l0} \\ \Delta K_G \\ \Delta K_{Pl} \\ \Delta K_{Ql} \end{bmatrix} \quad (22)$$

2.3 考虑负荷参数随机变化的负荷裕度百分数的分布

只考虑负荷的随机分布时,因其符合正态分布,由式(22)可知,负荷裕度百分数也是服从正态分布的。因此只要计算出其均值和方差,即得负荷裕度百分数扰动量的概率密度函数。其均值由连续潮流求得,方差由随机变量的协方差矩阵和负荷裕度百分数关于系统随机参数的灵敏度矩阵求得,如下式

$$\sigma^2 = L_p \times V_p \times L_p^T \quad (23)$$

2.4 半不变量法

已知随机变量的分布 $f(x)$, 期望值为 μ , 其 ν 阶中心矩

$$M_\nu = \int_{-\infty}^{\infty} (x - \mu)^\nu f(x) dx \quad (24)$$

前六阶半不变量

$$\begin{aligned} \chi_1 &= \mu & \chi_2 &= M_2 & \chi_3 &= M_3 \\ \chi_4 &= M_4 - 3M_2^2 & \chi_5 &= M_5 - 10M_3M_2 & & \\ \chi_6 &= M_6 - 15M_4M_2 - 10M_3^2 + 30M_2^3 & & & & \end{aligned} \quad (25)$$

由文献[12], 随机变量 X 的线性函数 $Y = aX + b$ 的半不变量

$$\chi'_1 = a\chi_1 + b \quad \chi'_\nu = a^\nu \chi_\nu \quad \nu > 1 \quad (26)$$

另外, n 个相互独立的随机变量 $X_1, X_2 \dots X_n$ 之和的半不变量等于其各阶半不变量之和。

随机变量 X 的 ν 阶规格化半不变量

$$\gamma_\nu = \chi'_\nu / \sigma^\nu \quad (27)$$

其中: $\sigma = \sqrt{\chi_2}$ 为标准方差。

利用随机变量的规格化的前六阶半不变量 γ_ν , 可以把随机变量的分布函数表示成 Edge worth 级数^[13], 然后对其求导即得到随机变量的概率密度函数。

3 计算流程

(1) 利用连续潮流计算负荷裕度百分数的期望值;

(2) 在只考虑风速的随机分布的情况下, 利用半不变量的线性性质求取系统负荷裕度百分数随机扰动的半不变量;

(3) 在只考虑负荷的随机分布的情况下, 利用灵敏度矩阵和协方差矩阵求取系统负荷裕度百分数随机扰动(服从正态分布)的均值和方差;

(4) 计算步骤 3 中负荷裕度百分数随机扰动的半不变量;

(5) 综合考虑风速和负荷随机分布时通过将步骤 2 和步骤 3 的结果进行叠加, 计算系统负荷裕度百分数的半不变量;

(6) 将步骤 5 中的结果用 Edge worth 级数展开并求其导数, 即得负荷裕度百分数的概率密度函数。

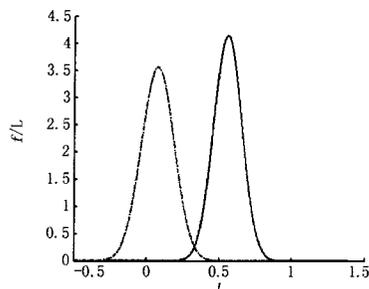
4 算例分析

针对 IEEE-30 节点系统利用本文方法和半不变量法进行分析, 同时采用 Monte Carlo 法进行了 5000

次的仿真计算, 其中选取 IEEE-30 节点系统中的第 14 号节点作为风电场并网点。假设风场共 12 台风机, 每台风机单机容量为 2 MW。负荷按等比例方式增长, 这里, 为简化计算, 不考虑增长系数的随机变化, 均取 1。

风机参数: 形状参数 $k=3$, 尺度参数 $c=7.5$ 。风场中共 12 台风机, 风机切入风速 $v_i = 2.5$ m/s, 额定风速 $v_r = 12$ m/s, 风机切出风速 $v_o = 25$ m/s, 风机额定输出功率 P_r 为 2 MW。

负荷有功随机参数参见文献[18], 无功随机参数中的标准差按照等功率因数方式计算。



注: 支路 2-5 断线同时节点 8 调相机停运的情况用点划线表示; 正常运行情况用实线表示。

图 1 IEEE-30 系统中利用本文方法求得的系统正常和非正常运行两种情况下的负荷裕度百分数的概率密度函数曲线

Fig.1 The probability density function curve of loading margin percent obtained in normal and abnormal operating circumstances using the proposed method in IEEE-30 system

如图 1 所示的曲线为采用本文方法计算得到的由于风速及负荷随机波动造成的电压稳定负荷裕度百分数波动的概率分布曲线。该结果可以直观地帮助运行规划人员了解电压稳定裕度的概率分布, 确定稳定裕度在某个范围内的概率, 发现系统运行的潜在危险和薄弱环节。

表 1 非正常运行状态下仿真计算的结果

Tab.1 Results of simulation in abnormal operating

circumstances			
断线支路, 发电 机(调相机)	均值 $E(\lambda)$	标准差 σ	失稳概率
-	0.5588	0.09628	0.317758e-8
12-14	0.5507	0.0950027	0.3249099e-8
2-4	0.4710	0.08909	0.607943e-7
2-5	0.1461	0.121585	0.1148225
2-5, 8	0.0765	0.1121953	0.2477338

由表 1 可知, 正常运行情况下系统发生电压崩溃的概率为 0.317758e-8, 接近于 0, 当出现断线故障以后系统失稳的概率明显提高, 当线路 2-5 断线

同时节点 8 上连接的调相机停运时,失稳概率高达 0.2477338。上述结果表明:以概率方式进行电力系统稳定裕度分析,可以更真实更全面地反映系统当前运行的状态。

表 2 本文方法和 Monte Carlo 法计算负荷裕度百分数的均值和方差

Tab.2 Using the proposed method in this paper and Monte Carlo method to calculate the expectation and standard deviation of loading margin percent

所用方法	均值 $E(\lambda)$	标准差 σ
本文方法	0.5588	0.09628
Monte Carlo	0.5562	0.09630
误差	0.47%	0.02546%

表 3 本文方法和半不变量法计算时间对比

Tab.3 Contrast of calculation time using the proposed method and moment and cumulate method

所用方法	均值 $E(\lambda)$	标准差 σ	计算时间/s
本文方法	0.5588	0.09628	4.2810
半不变量法	0.5588	0.09628	7.1720

从表 2 中的结果可以看出利用本文方法计算得到的电压稳定负荷裕度百分数的均值和方差误差很小,准确性很好。表 3 在计算时间上与半不变量法的对比分析则说明此方法在简化了计算的同时更加快捷。随着电网规模的不断扩大,在计算速度上的优势更加明显。

5 结论

本文在研究负荷裕度概率模型时,根据含有风电场电力系统中风速和负荷参数的概率性质,采用叠加原理和半不变量相结合的方法计算负荷裕度百分数的前六阶半不变量,然后进行 Edge worth 级数展开,最终得到其分布。并在此基础上计算非正常运行状态下的系统失稳概率,从而可以更准确合理地评估电力系统的电压稳定状态。通过将 IEEE-30 节点系统上的计算结果分别与 Monte Carlo 法和半不变量法计算得到的数值进行比较,表明了本文方法具有准确性和快速性。

参考文献

- [1] 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.
ZHOU Shuang-xi, ZHU Ling-zhi, GUO Xi-jiu, et al. The Voltage Stability Analysis and Control of Power System[M]. Beijing:China Electric Power Press, 2004.
- [2] 戴伟华,熊宁,李倡洪.静态电压崩溃点的实用解法[J].继电器,2007,35(5):25-28.

DAI Wei-hua, XIONG Ning, LI Chang-hong. A Practical Method of Tracing Static Voltage Collapse Point[J]. Relay, 2007, 35(5): 25-28.

- [3] Heydt G T, Burchett R C. Stochastic Analysis of Power System Dynamic Stability[A]. In: Proceeding Joint Automation Control Conf IEEE Publication CH122023CS[C].1977, (77):755-767.
- [4] Burchett R C, Heydt G T. A Generalized Method for Stochastic Analysis of the Dynamic Stability of Electric Power System[A]. In:IEEE PES, SM[C]. 1978.
- [5] 王锡凡,王秀丽.电力系统的随机潮流分析[J].西安交通大学学报,1988,22(3):88-97.
WANG Xi-fan, WANG Xiu-li. Probability Load Flow Analysis in Power Systems[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 1988, 22(3): 88-97.
- [6] 王成山,余旭阳.一种临界故障切除时间概率分布的求解方法[J].中国电机工程学报,2004,24(1):6-10.
WANG Cheng-shan, YU Xu-yang. A Method for Computing the Probability Distribution of Fault Critical Clearing Time[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(1): 6-10.
- [7] SU Chun-lin. Probabilistic Load-Flow Computation Using Point Estimate Method[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2005, 20(4): 1843-1851.
- [8] 彭昱,周玮,孙辉.基于网损灵敏度二阶指标的电压稳定概率评估[J].继电器,2006,34(18):22-26.
PENG Yu, ZHOU Wei, SUN Hui. Probabilistic Assessment Based on Second Order Loss Sensitivity for Voltage Stability[J]. Relay, 2006, 34(18): 22-26.
- [9] 戴剑锋,王海超,周双喜,等.基于负荷裕度随机特性的电压失稳概率问题研究[J].中国电机工程学报,2006,26(13):26-30.
DAI Jian-feng, WANG Hai-chao, ZHOU Shuang-xi, et al. A Study on Probability of Voltage Instability Based on the Stochastic Characteristic of Load Margin Index[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(13): 26-30.
- [10] 曹一家,王春林,程时杰.电力系统静态稳定概率计算的几种新方法[J].电力系统自动化,1997,21(6):13-18.
CAO Yi-jia, WANG Chun-lin, CHENG Shi-jie. New Algorithms for Power System Steady State Stability Probability Evaluation[J]. Automation of Electric Power Systems, 1997, 21(6): 13-18.
- [11] 袁骏,段献忠,何仰赞,等.电力系统电压稳定灵敏度分析方法综述[J].电网技术,1997,21(9):7-10.
YUAN Jun, DUAN Xian-zhong, HE Yang-zan, et al. Summarization of the Sensitivity Analysis Method of Voltage Stability in Power Systems[J]. Power System Technology, 1997, 21(9): 7-10.

(下转第 53 页 continued on page 53)

使用情况等。

5 总结

对于电力调度数据网络,实时数据和生产数据的传输基本上相当于恒定负载,实时性较强,管理信息的传输基本上是突发性负载,传输频度较低,两类负载具有很好的互补性。

华北电力调度数据网络的设计建立在对其承载业务分析的基础上,电力调度业务的实时性、准确性和安全性是首要问题,是数据网络设计的出发点。网络的安全性设计是电力调度数据网的重点,MPLS VPN 为网络安全提供了可靠的技术支持,网络管理系统采用优秀的网络管理解决方案,将为网络投运后的运行、维护带来便利。

参考文献

- [1] 张永健. 电网监控与调度自动化[M]. 北京: 中国电力出版社, 2005.
- [2] 王益民. 国家电力调度数据网的设计与实施[J]. 电网技术, 2005, 29 (22): 1-6.
WANG Yi-min. Design and Implementation of State Grid Dispatching Digital Network[J]. Power System Technology, 2005, 29 (22): 1-6.

- [3] 彭清卿, 向力, 卢长燕,等. 国家电力调度数据网组网研究[J]. 电力系统自动化, 2004, 28 (8): 10-14.
PENG Qing-qing, XIANG Li, LU Chang-yan, et al. Study on State Grid Dispatching Digital Network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28 (8): 10-14.
- [4] 林荣东, 陈枫, 林为民,等. 基于广域网连接的电力数据网设计[J]. 电力系统自动化, 2000, 24 (10): 53-56.
LIN Rong-dong, CHEN Feng, LIN Wei-min, et al. The Design of Power Data Network Based on WAN[J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24 (10): 53-56.

收稿日期: 2007-04-11; 修回日期: 2007-06-22

作者简介:

张宣江 (1964-), 男, 高级工程师, 从事电力系统运行技术和人力资源方面的工作; E-mail: hbd_l_yangjing@126.com

卢国良 (1974-), 男, 高级工程师, 从事电力市场营销方面的研究和工作;

孙燕萍 (1974-), 女, 工程师, 从事电力市场营销方面的研究和工作。

(上接第 30 页 continued from page 30)

- [12] Cramer H. Mathematical Methods of Statistics[M]. Princeton: Princeton University Press, 1974.
- [13] 王锡凡, 电力系统优化规划[M]. 北京: 水利电力出版社, 1990.
- [14] Zhao M, Chen Z, Blaabjerg F. Probabilistic Capacity of a Grid Connected Wind Farm Based on Optimization Method[J]. Renewable Energy, 2006, 31 (13): 2171-2187.
- [15] Feijoo A E, Cidras J. Modeling of Wind Farms in the Load Flow Analysis[J]. IEEE Trans on Power System, 2000, 15 (1): 110-115.
- [16] Greene S, Dobson I, Alvarado F L. Sensitivity of the Loading Margin to Voltage Collapse with Respect to Arbitrary Parameters[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1997, 12 (1): 262-270.
- [17] 陈为化, 江全元, 曹一家, 等. 电力系统电压崩溃的风险评估[J]. 电网技术, 2005, 29 (19): 6-11.
CHEN Wei-hua, JIANG Quan-yuan, CAO Yi-jia, et al. Risk Assessment of Voltage Collapse in Power System[J]. Power System Technology, 2005, 29 (19):

6-11.

- [18] 雷亚洲, 王伟胜, 印永华, 等. 基于机会约束规划的风电穿透功率极限计算[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22 (5): 32-35.
LEI Ya-zhou, WANG Wei-sheng, YIN Yong-hua, et al. Wind Power Penetration Limit Calculation Based on Chance Constrained Programming[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22 (5): 32-35.

收稿日期: 2007-07-10

作者简介:

周 玮 (1981-), 女, 在读博士, 主要从事含有风电场电力系统静态安全分析工作; E-mail: zhouwei_ee@163.com

彭 昱 (1973-), 女, 在读博士, 主要从事电力系统电压稳定, 优化的研究工作;

孙 辉 (1964-), 女, 教授, 博士生导师, 主要从事电力系统分析、新能源控制技术, DFACTS 在电力系统中的应用等研究工作。