

基于蒙特卡罗方法的风电场有功出力的概率性评估

张建华¹, 王昕伟¹, 蒋程¹, 于雷¹, 俞悦², 余加喜²

(1. 华北电力大学新能源电力系统国家重点实验室, 北京 102206; 2. 海南电网公司, 海南 海口 570203)

摘要: 风电具有随机性和间歇性的特点, 常规确定性方法已无法准确评估风电场有功出力情况。为了解决此问题, 引入概率性方法对风电场出力进行评估。考虑运行、停运和降额状态, 建立了风电机组的多状态故障模型。在此基础上, 考虑风速的随机性、风电场尾流效应建立了风电场的可靠性模型。基于此模型, 应用蒙特卡罗方法给出了风电场有功出力概率评估的方法和流程。在 Matlab 中编写了相关程序, 并对风电场的有功出力进行了概率评估, 分析了不同可靠性参数和模型参数对评估结果的影响, 从中可以看出风速模型中形状参数和尺度参数对评估结果影响较大。

关键词: 风电场; 多状态; 概率评估; 蒙特卡罗方法

Probabilistic assessment of wind farm active power based on Monte-Carlo simulation

ZHANG Jian-hua¹, WANG Xin-wei¹, JIANG Cheng¹, YU Lei¹, YU Yue², YU Jia-xi²

(1. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources, North China Electric Power University, Beijing 102206, China; 2. Hainan Power Grid Company, Haikou 570203, China)

Abstract: The conventional deterministic methods can not accurately assess the active power output of the wind farm due to the randomness and intermittence of wind power, and the probabilistic methods are commonly used to solve this problem. In this paper the multi-state fault model is built considering run, outage and derating state of wind turbine, and then based on the turbine failure model, the reliability model of the wind farm is established considering the randomness of the wind speed and the wind farm wake effects. The active wind farm output probability assessment methods and processes are given based on the Monte Carlo method based on the above-mentioned model. The related programs are written in MATLAB, and the probability assessment for active power output of a wind farm is carried out, based on which the effects of reliability parameters and model parameters on assessment results are analyzed. The results show that the shape parameter and scale parameter of wind speed model have a greater impact on the results of the assessment.

This work is supported by National High Technology Research and Development Program of China (863 Program) (No. 2012AA050201).

Key words: wind farms; multi-state; probabilistic assessment; Monte Carlo method

中图分类号: TM732 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)03-0082-06

0 引言

风力发电被公认为是一种最理想的可再生能源发电方式之一, 大规模发展风电, 不仅是能源开发的需要, 也是环境保护的需要。但由于风电出力具有随机性、间歇性和波动性等特点, 大规模风电并网将对电网电压、稳定性和调度产生深远的影响^[1]。这迫切需要对风电场的可靠性进行深入的研究, 并对其有功出力进行评估。

国内外学者针对风电的可靠性已作了初步的研究。文献[2]把所评估期间内的风速等效分成若干时段, 建立风电机组的可靠性模型, 但此方法只适用于长期评估, 因为短时期内风速变化的随机性较大, 很难将其分成若干段。文献[3]基于风速的韦布分布建立了风机的可靠性模型, 但此模型没有考虑风机的故障状态。文献[4-5]考虑了风能的随机特性和风机的强迫停运建立了风电场的可靠性模型, 但没考虑风机的降额状态。在上述研究中, 均没有考虑风电场的尾流效应, 文献[6-8]考虑了尾流效应建立风电场模型, 但其所建的可靠性模型中只包含停运和运行两个状态, 此方法在传统电力系统元件

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863计划)资助项目(2012AA050201)

的可靠性建模中是可行的, 但由于风力发电机组处在降额状态的时间在整个运行期间中所占的比例较大^[9], 忽略其降额状态将产生较大的误差。

针对上述问题, 本文首先考虑风电机组的故障与降额状态、风速的随机性和风电场尾流效应建立了风电场的可靠性模型; 然后介绍了用于概率性评估的蒙特卡罗方法, 并基于此方法给出了风电场有功出力的概率性评估方法和流程; 最后在 Matlab 中编写了相关仿真程序, 并对某风电场有功出力进行了概率评估, 通过分析不同可靠性参数对评估结果的影响, 验证了所建可靠性模型和评估方法的有效性和适应性。

1 风电场的可靠性模型

风电场的出力受两方面的影响, 即风速和风机运行状态, 且这两个因素都是不确定的。

1.1 风速模型

对大量实测风速数据的统计结果表明, 风速的变化规律服从两参数的Weibull分布^[10-12], 用随机变量 V 代表风速的大小, 则其分布函数可表示为

$$F(V) = P(v \leq V) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{V}{W_c}\right)^{W_k}\right] \quad (1)$$

式中: W_k 和 W_c 为威布尔分布的两个参数, W_k 称作形状参数, 其为一个无量纲的数; W_c 为尺度参数, 其值反映该风电场的平均风速; V 代表给定风速, 单位是 m/s。

令

$$U = F(V) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{V}{W_c}\right)^{W_k}\right] \quad (2)$$

式中, U 为在 $[0, 1]$ 区间均匀分布的随机数。

由式(2)把风速 V 解出来, 并整理得

$$V = W_c (-\ln(U))^{1/W_k} \quad (3)$$

在大型风电场中, 由于尾流效应的影响, 坐落于下风向的风电机组的风速将低于上风向的风电机组的风速, 本文采用 Jensen 模型来模拟平坦地形的尾流情况, 如图 1 所示^[13]。

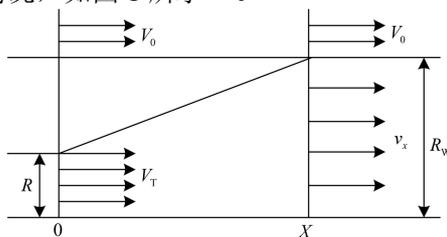


图 1 Jensen 尾流效应模型
Fig. 1 Jensen wake effect model

图中, R 表示风机叶轮半径, R_w 表示尾流半径, V_0 表示平均风速, V_T 表示通过叶片的风速, v_x 表示受尾流影响的风速, X 表示两个风机之间的距离。

根据图 1 可以计算出受尾流影响的风速为

$$v_x = V_0 \left(1 - \left(1 - (1 - C_T)^{1/2}\right) \left(\frac{R}{R + kX}\right)^2\right) \quad (4)$$

式中, k 和 C_T 分别为尾流下降系数和风机推力系数。

1.2 风能转化模型

经过大量研究^[14-15], 风电机组的输出功率与风速之间满足一种特定的关系曲线, 称为风电机组功率特性曲线。一种典型的风电机组功率特性曲线如图 2 所示。

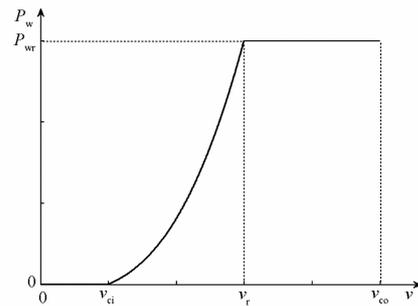


图 2 风电机组功率曲线
Fig. 2 Wind turbine power curve

图中, v_{ci} 代表切入风速, v_{co} 代表切出风速, v_r 代表额定风速, P_{wr} 代表额定风速下风机发的有功功率, v 为该风场的风速值。

根据空气动力学原理, 风力发电机组发出的电功率跟风速的 3 次方成正比, 其输出功率与风速的关系可表示为

$$P_w(v_x) = \begin{cases} 0 & (v_x < v_{ci}) \cup (v_x > v_{co}) \\ \frac{P_{wr}}{v_r^3 - v_{ci}^3} (v_x^3 - v_{ci}^3) & (v_{ci} \leq v_x \leq v_r) \\ P_{wr} & (v_r < v_x \leq v_{co}) \end{cases} \quad (5)$$

式中, $P_w(v_x)$ 代表风速 v_x 下风机发出的有功功率。

1.3 风电机组的故障模型

包含运行、降额和停运状态的风电机组 3 状态故障模型如图 3 所示。

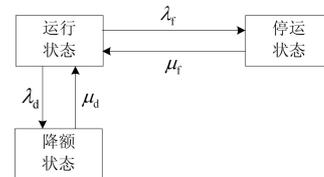


图 3 风电机组多状态故障模型

Fig. 3 Wind turbine multi-state fault model

图中, λ_r 和 λ_d 分别为停运和降额状态的转移率; μ_r 和 μ_d 分别为从停运和降额状态修复的修复率。

通常情况下认为风机的停运和降额状态是随机事件, 将马尔可夫方法应用于图 3 所示的状态空间图, 可得出以下结果:

$$\begin{aligned} P_{f_0} &= \frac{\mu_d \lambda_r}{\lambda_d \mu_r + \lambda_r \mu_d + \mu_d \mu_r} \\ P_{d_0} &= \frac{\lambda_d \mu_r}{\lambda_d \mu_r + \lambda_r \mu_d + \mu_d \mu_r} \end{aligned} \quad (6)$$

式中, P_{f_0} 和 P_{d_0} 分别为停运和降额状态的概率。

在 $[0, 1]$ 区间抽取均匀分布的随机数 U , 根据大数定律, 可得发电机在每次抽样时的状态, 如式 (7) 所示。

$$S = \begin{cases} 0 \text{ (运行)} & P_{d_0} + P_{f_0} < U \leq 1 \\ 1 \text{ (停运)} & P_{d_0} < U \leq P_{d_0} + P_{f_0} \\ 2 \text{ (降额)} & 0 \leq U \leq P_{d_0} \end{cases} \quad (7)$$

式中: S 代表风电机组的运行状态; P_{f_0} 代表风电机组停运状态的概率; P_{d_0} 为降额状态的概率。

1.4 风电场的出力模型

根据式 (5) 和式 (7), 可得风电机组的出力为

$$P_{Gi} = \begin{cases} P_w(v_x) & P_{d_0} + P_{f_0} < U \leq 1 \\ 0 & P_{d_0} < U \leq P_{d_0} + P_{f_0} \\ \alpha \cdot P_w(v_x) & 0 \leq U \leq P_{d_0} \end{cases} \quad (8)$$

式中: P_{Gi} 为第 i 台风电机组的出力; $P_w(v_x)$ 为风电机组在风速 v_x 下吸收的风能; α 为降额系数。

风电场的出力为所有风机出力的总和, 可表示为

$$P_F = \sum_{i=1}^m P_{Gi} \quad (9)$$

式中, m 表示风机的个数。

2 风电场有功出力的概率性评估

2.1 蒙特卡罗方法^[16]

蒙特卡罗方法一般也被称为状态抽样法, 被广泛用于电力系统风险评估中, 其基本原理是: 每个元件的状态可以由该状态出现的概率确定, 所有元件状态的组合构成整个系统的状态。

对于系统中任一个元件 m , 设其停运概率为 $P_{f_0_m}$, 元件的状态可表示为

$$S_i = \begin{cases} 0 \text{ (运行状态)} & R_m > P_{f_0_m} \\ 1 \text{ (停运状态)} & 0 \leq R_m \leq P_{f_0_m} \end{cases} \quad (10)$$

其中, R_m 表示在均匀分布 $[0, 1]$ 区间抽到的随机数。

根据式 (10), 对系统中所有元件进行抽样确定

其状态, 则包含 M 个元件的系统抽样状态可表示为

$$\mathbf{S} = (S_1, S_2, \dots, S_m, \dots, S_M) \quad (11)$$

当抽样的数量足够大时, 系统状态 \mathbf{S} 的抽样频率可作为其概率的无偏估计, 如式 (3) 所示。

$$\hat{P}(\mathbf{S}) = \frac{n(\mathbf{S})}{N_s} \quad (12)$$

式中: N_s 为抽样次数; $n(\mathbf{S})$ 表示状态 \mathbf{S} 出现的次数。

当每一个系统状态的概率通过抽样估计出来以后, 便可以计算系统的可靠性指标的均值, 其表达式为

$$\hat{E}(J_R) = \sum_{\mathbf{S} \in \text{Fault}} F(\mathbf{S}) \cdot \hat{P}(\mathbf{S}) \quad (13)$$

式中: J_R 为可靠性指标的实际值; $F(\mathbf{S})$ 为状态 \mathbf{S} 的后果函数, 它主要指状态 \mathbf{S} 下系统的损失或后果, 对电力系统来说, 一般指负荷带来的经济损失;

$\hat{P}(\mathbf{S})$ 代表状态 \mathbf{S} 出现的概率。

用式 (12) 估计可靠性指标的不确定性可用样本均值的方差进行量度, 其定义为

$$V\left(\hat{E}(J_R)\right) = \frac{1}{N_s(N_s - 1)} \sum_{k=1}^{N_s} \left(F_k(\mathbf{S}) - \hat{E}(J_R)\right)^2 \quad (14)$$

蒙特卡罗模拟达到的精度水平可用方差系数来量度, 其可表示为

$$\eta = \sqrt{V\left(\hat{E}(J_R)\right)} / \hat{E}(J_R) \quad (15)$$

2.2 风电场有功出力的概率性评估

假设把风电场的有功出力等分成 N 个状态, 则每个状态的出力可表示为

$$P_{WSn} = (n-1)P_{Wint} / N \quad n=1, 2, \dots, N-1, N, N+1 \quad (16)$$

把每次抽样所得到的风电场出力归算到所分的出力状态, 如式 (17)。

$$\begin{cases} P_{Wk} < \frac{P_{Wint}}{2N}, & 0 \\ \frac{(2n-3)P_{Wint}}{2N} \leq P_{Wk} < \frac{(2n-1)P_{Wint}}{2N}, & \frac{(n-1)P_{Wint}}{N} \\ P_{Wk} \geq \frac{(2N-1)P_{Wint}}{2N}, & P_{Wint} \end{cases} \quad (17)$$

其中: P_{Wk} 为第 k 次抽样得到的风电场出力; P_{Wint} 为风电场的装机容量。

风电场有功出力的概率评估流程如图 4 所示。

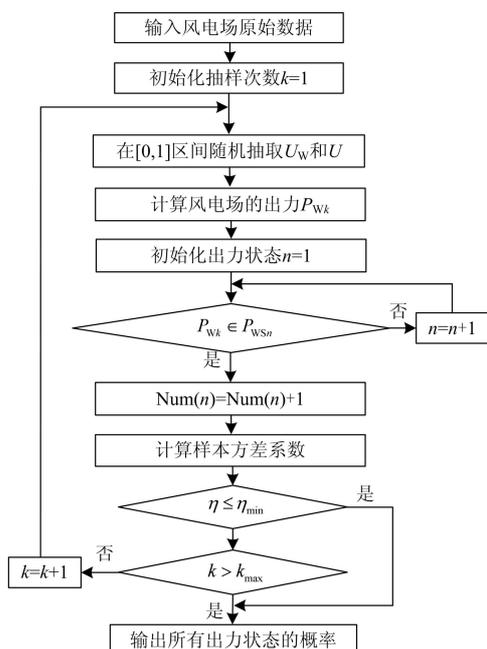


图4 风电场有功出力概率评估流程图

Fig. 4 Probabilistic assessment flowchart of wind farm active power output

从图4可以看出, 评估的基本步骤为

1) 输入风电场原始数据: 风电机组的停运率、降额率, 风速分布的参数, 风机个数; 最大采样次数及最小方差系数。

2) 随机抽样: 在[0,1]区间内随机抽取 U_w 和 U , 其中 U_w 用来确定风机的状态, U 用来确定风速。

3) 计算第 k 次抽样风电场的有功出力, 并根据式(17)判断该出力所属的状态。

4) 由式(15)计算方差系数, 若满足精度要求, 则采样结束, 否则检查采样次数, 若达到最大值, 则采样结束, 否则, $k=k+1$ 转入步骤2)。

5) 判断所有出力状态是否评估完, 若评估完, 则输出所有出力状态出现的概率。

3 算例分析

3.1 算例描述

采用总装机容量 150 MW 的风电场进行仿真分析, 该风电场含有 100 台 1.5 MW 双馈机组, 其可靠性参数如表 1 所示。

表1 风电机组可靠性参数
Table 1 Wind turbine reliability parameters

容量/ MW	停运率/ (次/年)	修复率/ (次/年)	降额率/ (次/年)	恢复率/ (次/年)	降额 系数
1.50	3.96	58.4	3.84	3.8	0.6

根据式(6)可以计算出风机的停运概率和降额概率分别为 0.059 5 和 0.062 7。

3.2 风电机组概率评估结果

把风电场的出力等分成 20 个状态, 停运概率和降额概率分别为 0.059 5 和 0.062 7, 尺度参数 W_c 和形状参数 W_k 分别为 8.5 和 2, 评估结果如图 5 所示。

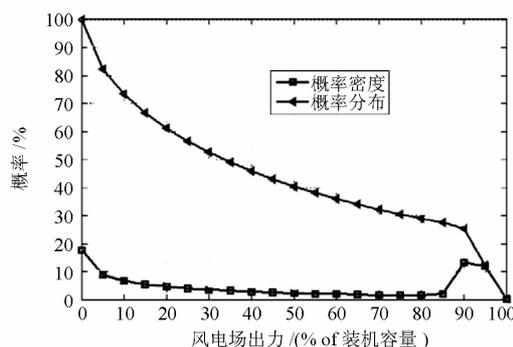


图5 风电场概率评估结果

Fig. 5 Results of the probabilistic assessment of the wind farm

图5为风电场有功出力的概率评估结果, 其中概率密度曲线显示了每个状态出现的概率, 概率分布曲线显示了风电场可用出力大于某个值的概率; 如图所示, 在本次算例中, 风电场有功出力为装机容量 50% 的概率大概为 3%, 风电场有功出力大于装机容量 50% 的概率大概为 40%, 从中还可以看出, 风电场能满发的概率很小。

3.3 可靠性参数灵敏度分析

为了分析风电机组可靠性参数对风电场有功出力评估结果的影响, 假设停运概率和降额概率分别为不同的值, 评估结果如图 6 和图 7 所示。

图6为不同故障概率下风电场有功出力的概率分布曲线, 其中“故障概率=0”表示不考虑风电机组的故障, 从中可以看出, 不同故障概率对接近满

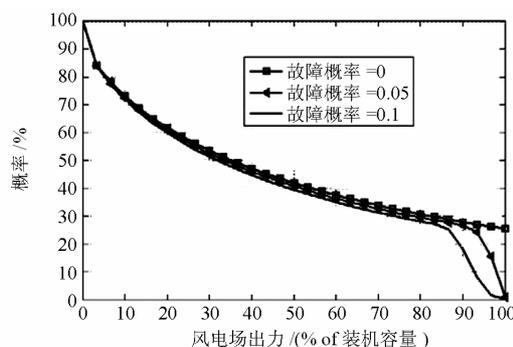


图6 故障概率对有功出力概率分布的影响

Fig. 6 Effect of failure probability on active power output probability distributions

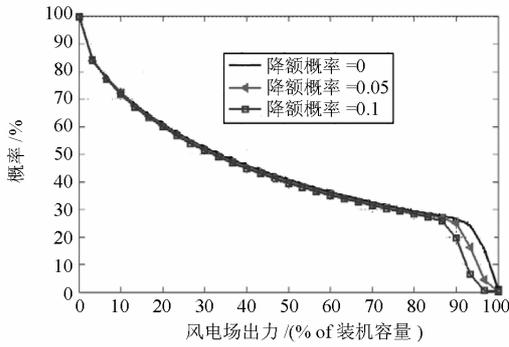


图 7 降额概率对有功出力概率分布的影响

Fig. 7 Effect of derating probability on active power output probability distributions

发的状态影响较大，而且故障概率越大，同一个状态出现的概率越小；图 7 为不同降额概率下风电场有功出力的概率分布曲线，其中“降额概率=0”表示不考虑风电机组的降额，从中可以看出，不同降额概率对接近满发的状态影响较大，而且降额概率越大，同一个状态出现的概率越小。

3.4 模型参数灵敏度分析

为了分析状态数对风电场有功出力评估结果的影响，把风电场出力的状态数 N 分别设为 10、30 和 60，评估结果如图 8 所示。

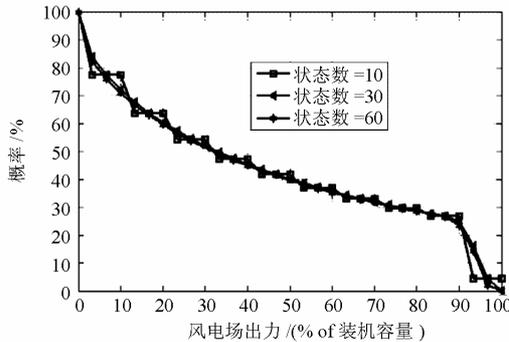


图 8 状态数对有功出力概率分布的影响

Fig. 8 Effect of the number of states on active power output probability distributions

图 8 为不同状态数下风电场有功出力的概率分布曲线，从中可以看出，当状态数较小时，评估的精度较低，如图所示，当状态数为 10 时，出力为 15% 和 20% 对应的概率均为 63% 左右，但是实际上它们的概率是不同的。

为了分析风速参数对风电场有功出力评估结果的影响，假设风速的尺度参数和形状参数分别取不同的值，评估结果如图 9 和图 10 所示。

图 9 为不同尺度参数下风电场有功出力的概率分布曲线，图 10 为不同形状参数下风电场有功出力的概率分布曲线，从中可以看出，尺度参数对出力

的概率分布影响较大，形状参数的影响相对较小，而且主要集中在出力较小的状态。

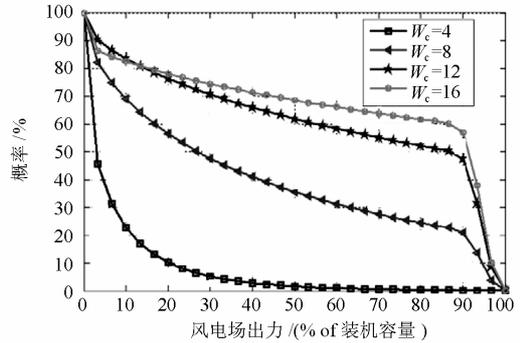


图 9 尺度参数对有功出力概率分布的影响

Fig. 9 Effect of scale parameter on active power output probability distributions

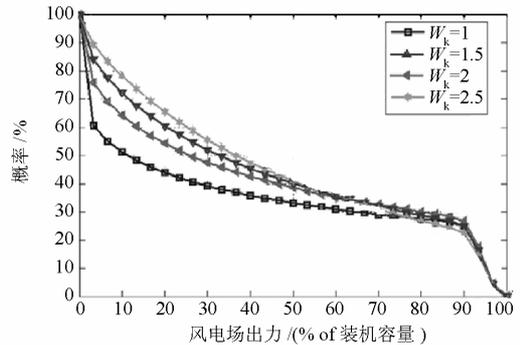


图 10 形状参数对有功出力概率分布的影响

Fig. 10 Effect of shape parameter on active power output probability distributions

4 结论

通过对风电场的仿真和分析，得到如下结论：

1) 风电场的有功出力一般小于其装机容量，本例中出力大于装机容量 90% 的概率不足 30%，而且满发(所有的风机都满发)的概率几乎为 0。

2) 风电机组的故障概率和降额概率对评估结果有一定的影响，在实际应用中应考虑风机的故障和降额状态。

3) 模型的精度随状态数的增加而提高，但需要的计算时间随之增加，在实际应用中应协调精度与速度的关系。

4) 风速的尺度参数 W_k 和形状参数 W_c 对评估结果影响较大，在实际应用中应该尽量使用高精度的 W_k 和 W_c ，以保证评估结果的可信度。

参考文献

[1] 张丽英, 叶廷路, 辛耀中, 等. 大规模风电接入电网

- 的相关问题及措施[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(25): 1-8.
- ZHANG Li-ying, YE Ting-lu, XIN Yao-zhong, et al. Problems and measures of power grid accommodating large scale wind power[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(25): 1-8.
- [2] 栗文义, 王银莎, 郭鑫, 等. 基于 well-being 模型的风力发电系统可靠性评估[J]. 华东电力, 2011, 39(7): 1062-1065.
- LI Wen-yi, WANG Yin-sha, GUO Xin, et al. Reliability evaluation of wind power system based on well-being model[J]. East China Electric power, 2011, 39(7): 1062-1065.
- [3] 吴义纯, 丁明. 基于蒙特卡罗仿真的风力发电系统可靠性评价[J]. 电力自动化设备, 2004, 24(12): 70-73.
- WU Yi-chun, DING Ming. Reliability assessment of wind power generation system based on Monte-Carlo simulation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2004, 24(12): 70-73.
- [4] 周明, 冉瑞江, 李庚银, 等. 风电并网系统可用输电能力的评估[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(22): 14-21.
- ZHOU Ming, RAN Rui-jiang, LI Geng-yin, et al. Assessment on available transfer capability of wind farm incorporated system[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(22): 14-21.
- [5] 华文, 徐政. 包含风电场的发电系统可靠性研究[J]. 高压电气, 2010, 46(12): 36-40.
- HUA Wen, XU Zheng. Reliability assessment of generation systems containing wind farm[J]. High Voltage Apparatus, 2010, 46(12): 36-40.
- [6] 吴义纯, 丁明, 李生虎. 风电场对输电系统可靠性影响的评估[J]. 电工技术学报, 2004, 19(11): 72-76.
- WU Yi-chun, DING Ming, LI Sheng-hu. Reliability assessment of wind farms in generation and transmission systems[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2004, 19(11): 72-76.
- [7] 张粒子, 王茜. 计及负荷损失费用的含风电场输电系统可靠性评估[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(20): 40-44.
- ZHANG Li-zi, WANG Qian. Reliability assessment of composite generation and transmission systems with wind farms considering load loss cost[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(20): 40-44.
- [8] Bhuiyan F A, Yazdani A. Reliability assessment of a wind-power system with integrated energy storage[J]. IET Renewable Power Generation, 2010, 4(3): 211-220.
- [9] 杨明明. 大型风电机组故障模式统计分析及故障诊断[D]. 北京: 华北电力大学, 2009.
- [10] 齐雪雯, 谢开贵, 胡博. 风速分布预测的指数平滑模型及其在配电网可靠性中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(12): 1-7.
- QI Xue-wen, XIE Kai-gui, HU Bo. Exponential smoothing model for wind speed distribution forecast and its application in electrical distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(12): 1-7.
- [11] Chen F, Athreya K B, Sastry V V, et al. Function space valued Markov model for electric arc furnace[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2004, 19(2): 826-833.
- [12] Hetzer J, Yu D C, Bhattarai K. An economic dispatch model incorporating wind power[J]. IEEE Trans on Energy Conversion, 2008, 23(2): 603-611.
- [13] 黄梅, 万航羽. 在动态仿真中风电场模型的简化[J]. 电工技术学报, 2009, 24(9): 147-152.
- HUANG Mei, WAN Hang-yu. Simplification of wind farm model for dynamic simulation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(9): 147-152.
- [14] 黄学良, 刘志仁, 祝瑞金, 等. 大容量变速恒频风电机组接入对电网运行的影响分析[J]. 电工技术学报, 2010, 25(4): 142-149.
- HUANG Xue-liang, LIU Zhi-ren, ZHU Rui-jin, et al. Impact of power system integrated with large capacity of variable speed constant frequency wind turbines[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(4): 142-149.
- [15] 苏勋文, 米增强, 陈盈今. 基于运行数据的风电机组建模方法[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(9): 52-54.
- SU Xun-wen, MI Zeng-qiang, CHEN Ying-jin. Method for modeling wind turbines based on operating data[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(9): 52-54.
- [16] 丁明, 吴义纯, 张立军. 风电场风速概率分布参数计算方法的研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(10): 107-110.
- DING Ming, WU Yi-chun, ZHANG Li-jun. Study on the algorithm to the probabilistic distribution parameters of wind speed in wind farms[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(10): 107-110.

收稿日期: 2013-06-18; 修回日期: 2013-09-28

作者简介:

张建华(1952-), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电力系统分析与控制、电力系统安全和可靠性分析; E-mail: jh Zhang001@163.com

王昕伟(1972-), 男, 博士研究生, 研究方向为电力系统分析与控制、电力系统安全和可靠性分析;

蒋程(1986-), 男, 博士研究生, 研究方向为电力系统分析与控制、电力系统安全和可靠性分析。