

含大型风电场的电力系统概率最大 输电能力快速计算

王成山, 王兴刚, 孙 玮

(天津大学电气与自动化工程学院, 天津市 南开区 300072)

Fast Calculation and Analysis of Probabilistic Total Transfer Capability in Power System Including Large-scale Wind Farms

WANG Cheng-shan, WANG Xing-gang, SUN Wei

(School of Electrical Engineering & Automation, Tianjin University, Nankai District, Tianjin 300072, China)

ABSTRACT: The paper presents a set of parameterized power flow equations containing asynchronous generator model, derives a hyper-plane equation to estimate part of the static voltage stability region boundary in the extended full injection space including wind power. Then a fast probabilistic method to evaluate total transfer capability (TTC) in power system including large-scale wind farms is developed, in which wind speed, loads, generation and device outage uncertainties are considered at the same time. Compared with traditional methods, the proposed method can not only consider conveniently the influence of wind power randomness, but also significantly reduce the computation load while maintaining a satisfied accuracy. Further more, the influence of wind speed probability distribution parameters on TTC is revealed based on the method.

KEY WORDS: wind farm; wind power generation; available transfer capability; total transfer capability; voltage stability region; Monte Carlo simulation; fast calculation

摘要: 针对含大型风电场的电力系统概率最大输电能力(total transfer capability, TTC)展开研究, 建立了加入异步风力发电机模型的含参潮流模型, 推导了含风电场注入功率项的全注入空间静态电压稳定域边界局部切平面解析式, 在此基础上提出了将 Monte Carlo 仿真和电压稳定域方法相结合的综合考虑风电场风速、负荷、发电机出力和设备故障不确定性因素的概率 TTC 分层快速计算方法。利用该方法进一步分析了风速概率分布参数对 TTC 的影响, 结果表明, 准确获取风电场风速分布参数是准确计算概率 TTC 的前提。

关键词: 风电场; 风力发电; 可用输电能力; 最大输电能力; 电压稳定域; 蒙特卡罗仿真; 快速计算

基金项目: 国家杰出青年科学基金项目(50625722); 教育部科学技术研究重大项目(306004)。

Project Supported by Scientific Funds for Outstanding Young Scientists of China (50625722).

0 引言

风力发电是当前世界上增长速度最快的新能源利用方式, 近年来全球风电市场每年都以超过20%的速度增长。根据国家“十一五”规划, 2020年我国风电装机容量将达到30 GW, 占全国电力总装机容量的3%。随着越来越多大型风电场直接连入输电系统, 有关风电并网的相关研究工作日益得到重视^[1-6]。

可用输电能力(available transfer capability, ATC)^[7]是十分重要的系统运行参数。在含大型风电场的输电系统中, 由于风速的随机性和间歇性直接影响风电场的有功出力和无功吸收, 从而对ATC产生不可忽视的影响。当前ATC在线计算多采用确定性的求解方法^[8], 该方法虽然计算速度快, 但是难以准确描述风速变化及其它不确定因素对ATC的影响; 概率性方法更加适合包含风电场的ATC计算, 但现有的概率方法耗时太多, 难以实现在线应用^[9]。

为提高概率ATC的计算速度, 文献[10]提出将 Monte Carlo 仿真和静态电压稳定域^[11]方法相结合的概率最大输电能力(total transfer capability, TTC)快速计算方法。文献[12]进一步提出了针对设备故障的概率TTC 分层计算模型。为了能够将该方法扩展到包含大型风电场的电力系统中, 寻找计及风速随机性的概率TTC快速计算方法, 本文在文献[10-12]的基础上建立了加入异步风力发电机模型的系统含参潮流模型, 推导出含风电场注入功率项的全注入空间静态电压稳定域^[13]边界局部切平面解析式, 在此基础上提出了综合考虑风电场风速、负荷、发电机出

力和设备故障不确定性因素的概率TTC分层快速计算方法。利用所提出的方法，进一步分析了风速期望值和风速概率分布形状对系统TTC的影响。

1 风电场模型

1.1 风速模型

对大量实测数据的分析结果表明，一个地区风速变化近似服从Weibull分布^[14]，其分布函数为

$$F_w(v) = P(V \leq v) = 1 - \exp[-(v/c)^k] \quad (1)$$

式中： k 为形状系数，一般取值范围为 1.8~2.3； c 为尺度系数，反映所描述地区的平均风速； k 和 c 可以通过实测风速数据求得^[15]。

本文采用文献[16]中的方法，通过Weibull分布随机数发生器 $v_i = c(-\ln x_i)^{1/k}$ (x_i 为在[0, 1]区间均匀分布的随机数)产生风速样本。

1.2 风力机模型

风电场风力机机械功率的表达式如下^[17]：

$$P_m = 0.5\rho Av^3 C_p \quad (2)$$

式中： ρ 为空气密度； A 为风力机的扫掠面积； v 为风速； C_p 为风力机的风能利用系数，表明风轮从风中获得的有效风能的比例，与尖速比 T_{tsr} 有关，可根据已有实验数据用插值法计算求得^[18]。其中， T_{tsr} 是叶轮尖的线速度与风速的比值，表达式为 $T_{tsr} = \omega R/v$ ， R 为叶片半径； ω 为风轮在风速为 v 时的旋转角速度。

1.3 异步风力发电机模型

异步发电机的等值电路和功率传递关系如图 1 所示^[19]。风力机传递到异步发电机转子上的机械功率 P_m 在等效电路中对应变阻 $R_r(1-s)/s$ (s 为滑差， $s < 0$)上的功率 P_r 。在 P_r 中扣除转子铜耗 P_{Cu2} ，得到输入定子绕组的电磁功率 P_M ，再扣除定子铜耗 P_{Cu1} 即得到注入电网的电功率 P_e 。其中， $R_s + jX_s$ 为定子阻抗， $R_r + jX_r$ 为转子阻抗， X_M 为激磁电抗。通过图 1，可以很方便地推导出采用 U 、 s 表示的 P_r 和 P_e 的表达式。

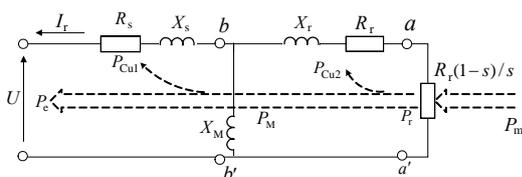


图 1 异步发电机的等效电路与功率传递关系

Fig. 1 Equivalent circuit of asynchronous generator and relationship of power transmission

2 含风电场的电压稳定域切平面解析式

2.1 加入异步风力发电机模型的含参潮流模型

文献[10]给出了负荷、发电机全注入空间中静态电压稳定域边界的局部切平面解析式，本文在文献[10]的基础上首先建立含异步风力发电机模型的含参潮流模型，在此基础上重新推导含风电场注入功率项的全注入空间静态电压稳定域边界局部切平面解析式。

设系统母线数为 n ，风电场节点集合为 N_w ，只有发电机参与功率分配的母线集合为 N_g ，只有负荷变化的母线集合为 N_l ，既有发电机参与功率分配又有负荷变化的母线集合为 N_h 。 α 、 β 分别为系统各个节点发电机和负荷有功注入的增长方向，即 $\alpha = [\alpha_1, \dots, \alpha_i, \dots, \alpha_n]^T$ ， $\beta = [\beta_1, \dots, \beta_i, \dots, \beta_n]^T$ ，则有

$$\begin{cases} \sum_{i \in N_g \cup N_h} \alpha_i = 1 \\ \sum_{i \in N_l \cup N_h} \beta_i = 1 \end{cases} \quad (3)$$

式中 $\alpha_i = \beta_i = 0$ ($i \notin N_g \cup N_l \cup N_h$)。

假定风电场功率波动 ΔP_m 由平衡机平衡，系统发电机有功注入增量等于系统有功负荷增量。引入异步风力发电机滑差变量 s 作为新的状态变量^[20]，以总有功负荷 λ 为参数建立如下含参潮流方程：

$$\begin{cases} P_{iG}^0 - P_{iL}^0 + (\alpha_i - \beta_i)\Delta\lambda + P_{ie}(U_i, s_i) - \\ U_i \sum_{j \in i} U_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) = 0 \\ -Q_{iL}^0 - \beta_i \cos \phi_i \Delta\lambda + Q_{ie}(U_i, s_i) - \\ U_i \sum_{j \in i} V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) = 0 \\ P_{im} - P_{ir}(U_i, s_i) = 0 \end{cases} \quad (4)$$

式中： $P_{ie} = Q_{ie} = P_{im} = P_{ir} = 0$ ($i \notin N_w$)；如图 1 所示， P_{im} 为风力机传递到异步发电机转子上的机械功率，可以看作风电场对包含异步发电机在内的电力网络的“功率注入”； P_{ie} 和 Q_{ie} 为异步发电机输出的电功率； P_{ir} 为图 1 所示等效电路中可变电阻 $R_r(1-s)/s$ 上的电功率； P_{ie} 、 Q_{ie} 和 P_{ir} 都是风电场端电压 U_i 和异步发电机滑差 s_i 的函数； P_{iG}^0 、 P_{iL}^0 、 Q_{iL}^0 、 P_{im}^0 分别代表初始点处发电机有功功率、负荷有功功率、负荷无功功率和风力机机械功率； $\cos \phi_i$ 为负荷功率因数； $i=1, 2, \dots, n$ 。

式(4)就是含异步风力发电机模型的系统含参

潮流模型。假定负荷均以恒功率因数增长,即 $\cos\phi_i$ 为常数,则式(4)可以简记为

$$f(x, \lambda, \alpha, \beta, P_m) = 0 \quad (5)$$

其中, x 为 n 维状态向量,包括 U 、 θ 和 s ; λ 为系统总有功负荷; P_m 为风电场机械功率注入向量。

2.2 含风电功率项的稳定域切平面解析式推导

在鞍节分叉点(以下简称 SNB 点)处对式(5)线性化,并左乘 SNB 点处雅可比矩阵零特征值对应的左特征向量 ω , 得

$$\omega f_x|_* \Delta x + \omega f_\lambda|_* \Delta \lambda + \omega f_\alpha|_* \Delta \alpha + \omega f_\beta|_* \Delta \beta + \omega f_{P_m}|_* \Delta P_m = 0 \quad (6)$$

式中“ $|_*$ ”表示对应系数的取值来自 SNB 点。

设 L 为系统负荷裕度,即

$$\lambda|_* = \lambda_0 + L \quad (7)$$

并且在 SNB 点处有

$$\omega f_x|_* = 0 \quad (8)$$

将式(7)、(8)带入式(6),得

$$\omega f_\lambda|_* \Delta L + \omega f_\alpha|_* \Delta \alpha + \omega f_\beta|_* \Delta \beta + \omega f_{P_m}|_* \Delta P_m = 0 \quad (9)$$

与文献[10]中推导类似,式(9)可视为 L - α - β - P_m 空间中电压稳定域边界的局部近似条件,若已知一个 SNB 点 P_1 , 将该点的对应数值代入式(9)的系数中,得到系数向量 $(\omega f_\lambda|_*^1, \omega f_\alpha|_*^1, \omega f_\beta|_*^1, \omega f_{P_m}|_*^1)$, 该系数向量就是 L - α - β - P_m 空间中的电压稳定域边界在点 P_1 处的法向量。设 P_1 在 L - α - β - P_m 空间中的坐标是 $(L^1, \alpha^1, \beta^1, P_m^1)$, 则根据点法式方程可得电压稳定域边界在 P_1 处的切平面表达式为

$$\sum_{i \in N_g \cup N_h} c_i^g \alpha_i + \sum_{i \in N_l \cup N_h} c_i^l \beta_i + \sum_{i \in N_w} c_i^p P_{im} + dL + g = 0 \quad (10)$$

其中,

$$\begin{cases} c_i^g = \omega f_{\alpha_i}|_*^1 \\ c_i^l = \omega f_{\beta_i}|_*^1 \\ c_i^p = \omega f_{P_{im}}|_*^1 \\ d = \omega f_\lambda|_*^1 \\ g = -(\sum_{i \in N_g \cup N_h} c_i^g \alpha_i^1 + \sum_{i \in N_l \cup N_h} c_i^l \beta_i^1 + \sum_{i \in N_w} c_i^p P_{im}^1 + dL^1) \end{cases} \quad (11)$$

为了将式(11)给出的 L - α - β - P_m 空间中的电压稳定域边界切平面方程映射到发电机、负荷和风电场全注入空间,考虑到如下关系:

$$\begin{cases} L = \sum_{i \in N_l \cup N_h} (P_{iL}|_* - P_{iL}^0) \\ P_{iL}|_* = P_{iL}^0 + \beta_i L \end{cases} \quad (12)$$

式中 $P_{iL}|_*$ 表示参与功率增长的负荷在电压稳定域边界上的有功注入。

又因为式(4)假定系统的发电机有功注入增量等于系统的有功负荷增量,则有

$$\begin{cases} L = \sum_{i \in N_g \cup N_h} (P_{iG}|_* - P_{iG}^0) \\ P_{iG}|_* = P_{iG}^0 + \alpha_i L \end{cases} \quad (13)$$

式中 $P_{iG}|_*$ 表示参与功率分配的发电机在电压稳定域边界上的有功注入。

利用式(12)、(13),将式(10)中的 L 、 α_i 、 β_i 代换成 $P_{iL}|_*$ 、 $P_{iG}|_*$, 可得

$$\begin{aligned} d[\sum_{i \in N_g \cup N_h} (P_{iG}|_* - P_{iG}^0)]^2 + g \sum_{i \in N_g \cup N_h} (P_{iG}|_* - P_{iG}^0) + \\ \sum_{i \in N_g \cup N_h} c_i^g (P_{iG}|_* - P_{iG}^0) + \sum_{i \in N_l \cup N_h} c_i^l (P_{iL}|_* - P_{iL}^0) + \\ \sum_{i \in N_w} [c_i^p P_{im} \sum_{j \in N_g \cup N_h} (P_{jG}|_* - P_{jG}^0)] = 0 \end{aligned} \quad (14)$$

在给定 SNB 点 P_1 对式(14)进行线性化得

$$\begin{aligned} \sum_{i \in N_g \cup N_h} (2dh + g + c_i^g + \sum_{j \in N_w} c_j^p P_{jm}^1) \Delta P_{iG}|_* + \\ \sum_{i \in N_l \cup N_h} c_i^l \Delta P_{iL}|_* + \sum_{i \in N_w} c_i^p h \Delta P_{im}|_* = 0 \end{aligned} \quad (15)$$

$$h = \sum_{i \in N_g \cup N_h} (P_{iG}|_*^1 - P_{iG}^0) \quad (16)$$

式中: P_{jm}^1 、 $P_{iG}|_*^1$ 为风电场和发电机在 P_1 点的有功注入; $\Delta P_{iG}|_*$ 、 $\Delta P_{iL}|_*$ 、 $\Delta P_{im}|_*$ 分别为系统从点 P_1 附近稳定域边界上的一点变化到另一点时 $P_{iG}|_*$ 、 $P_{iL}|_*$ 、 $P_{im}|_*$ 的变化量。

和式(10)类似,方程式(15)的系数也可以视为在空间 $\Psi \{P_{iG}, P_{iL}, P_{im} | i \in N_g \cup N_l \cup N_h \cup N_w\}$ 中,电压稳定域边界在点 P_1 处的法向量,将该向量连同 SNB 点 P_1 一起代入点法式平面方程,即可得到在空间 Ψ 中电压稳定域边界在 P_1 处的切平面表达式为

$$\begin{aligned} \sum_{i \in N_g \cup N_h} (2dh + g + c_i^g + \sum_{j \in N_w} c_j^p P_{jm}^1) (P_{iG}|_* - P_{iG}|_*^1) + \\ \sum_{i \in N_l \cup N_h} c_i^l (P_{iL}|_* - P_{iL}|_*^1) + \sum_{i \in N_w} c_i^p h (P_{im}|_* - P_{im}|_*^1) = 0 \end{aligned} \quad (17)$$

式(17)就是所求解的含风电场注入功率项的全注入空间静态电压稳定域边界局部切平面解析式。

3 算法流程

综合本文和文献[10-12]的内容,给出综合考虑风电场风速、负荷、发电机出力和设备故障不确定性因素的概率 TTC 分层快速计算方法:

(1) 给定各风电场风速 Weibull 分布参数 c 和 k , 利用 1.1 节给出的 Weibull 分布随机数发生器生成风速序列 $\{v_i | i=1,2,\dots,N\}$, 利用式(2)计算风电场机械功率序列 $\{P_{im} | i=1,2,\dots,N\}$ 。

(2) 通过 Monte Carlo 仿真生成负荷、发电机功率注入向量序列 $\{P_{iG}, P_{iL} | i=1,2,\dots,N\}$ 和设备故障集合序列 $\{Y_i | i=1,2,\dots,N\}$ 。

(3) 对 $\{P_{im} | i=1,2,\dots,N\}$ 和 $\{P_{iG}, P_{iL} | i=1,2,\dots,N\}$ 进行归一化, 得到包含风电场机械功率注入的全注入空间方向 $\{X_i | i=1,2,\dots,N\}$, 建立分层样本空间 $E\{X_i, Y_i | i=1,2,\dots,N\}$ 。

(4) 通过文献[10]给出的 VQ 聚类算法把样本空间划分为 M 个类别 ($M \ll N$), 聚类中心分别为 $\{K_1, \dots, K_M\}$ 。

(5) 对类别 k_i , 从初始点开始, 用连续潮流沿聚类中心 K_i 追踪至电压稳定域边界上一点 P_i , 用式(11)、(16)计算系数 c_i^g 、 c_i^l 、 c_i^p 、 d 、 g 、 h , 利用式(17)得到切平面方程 S_i 。这样对所有类别进行计算后, 得到一组切平面集合 $\{S_1, \dots, S_M\}$ 作为故障前电压稳定域边界 Σ 的近似。

(6) 如果 X_i 属于类别 T , 则其对应的故障前电压稳定域边界为切平面 S_T , 由空间直线与平面的交点公式直接得到 X_i 对应的故障前稳定域边界点 A_i 。如果 Y_i 为空, 即没有故障设备, 则直接由 A_i 得到该样本对应的 TTC; 如果 Y_i 不为空, 则存储 A_i 点的信息进行下一步计算。

(7) 对存在故障设备的样本 $\{X_i, Y_i | Y_i \notin \Phi\}$, 根据 Y_i 引入设备故障, 利用文献[12]给出的阻尼牛顿法从点 A_i 直接计算得到故障后电压稳定域边界 Σ' 上一点 P'_{i2} , 然后以 P'_{i2} 为切点求解 Σ 的切平面 S'_i 作为 P'_{i2} 附近 Σ 局部的近似, 求解 X_i 和 S'_i 的交点 B_i 。

(8) 判断是否满足 $\cos \langle \overline{P_{i0}A_i}, \overline{P_{i0}P'_{i2}} \rangle \geq \varepsilon$, 如果满足, 则可以使用点 B_i 作为实际边界点的近似, 利用 B_i 直接计算得到该样本对应的 TTC; 如果不满足, 则回到步骤 (7), 以 B_i 点作为新的 A_i 点重新进

行阻尼牛顿计算, 直到满足上述近似条件。

(9) 求出所有样本对应的 TTC 以后, 计算 TTC 的期望值, 并且对计算结果进行统计, 得到 TTC 概率密度函数, 绘出概率密度直方图。

4 含风电场的概率 TTC 计算与分析

4.1 本文方法的有效性检验

以修改后的 IEEE-118 节点系统为例验证本文算法的有效性。IEEE-118 系统接线图见文献[10], 假定区域 B 为供电侧, 区域 A 为受电侧。将各包含 100 台异步风力发电机(额定功率 600 kW)的 2 个风电场 WF1、WF2 通过变压器和 110 kV 线路分别接在 117 号节点和 23 号节点, 风电场数据如表 1 所示。风电机组机端装有分组投切的并联电容器。

表 1 风电场参数
Tab. 1 Parameters of asynchronous wind turbine generators

参数	数值	参数	数值
$\rho / (\text{kg}/\text{m}^3)$	1.224 5	U_N / kV	0.69
A / m^2	1840	R_s / Ω	0.004 53
R / m	23	X_s / Ω	0.050 70
$v_{in} / (\text{m}/\text{s})$	3	R_r / Ω	0.004 86
$v_N / (\text{m}/\text{s})$	13.5	X_r / Ω	0.149 10
$v_{out} / (\text{m}/\text{s})$	20	X_m / Ω	2.205 90

风电场 WF1、WF2 的风速均服从 Weibull 分布, 假定尺度系数 $c_1=10$, $c_2=11$; 形状系数 $k_1=k_2=2$ 。负荷和发电机出力的概率分布分别采用以负荷预测值和发电机初始分配比例为期望值的正态分布函数表示, 正态分布的方差假定为期望值的 0.2。考虑线路故障概率时, 假定所有线路故障概率均为 0.001, 并且不考虑引起系统分裂的线路故障情况。

依据上述条件, 通过 Monte Carlo 仿真产生 10 000 个样本进行概率分析。为了验证本文方法的正确性, 在下面的算例中把本文方法计算结果和标准 Monte Carlo 方法的结果进行比较。标准 Monte Carlo 方法在产生样本空间以后, 对样本空间中每一个样本都要进行 CPF 计算, 每次都能得到准确的 TTC, 因而可以获得准确的期望值和概率密度函数。

本文算例使用 C 语言编写程序, 在 Inter 迅驰 Celeron 1.4 GHz 移动 PC 上进行运算获得。

不考虑线路故障概率, 计算结果及 TTC 概率密度分别如表 2 和图 2 所示。考虑线路故障概率的计算结果及 TTC 概率密度分别如表 3 和图 3 所示。

由表 1 和表 3 可以看出, 针对含有大型风电场的电力系统, 本文采用多个包含风电场注入功率项

的全注入空间静态电压稳定域边界切平面对电压稳定域边界进行近似描述, 并采用分层计算模型处理线路故障情况, 该方法和标准 Monte Carlo 法得到的 TTC 期望值非常接近, 误差均在 1% 以下, 而算时间则比标准 Monte Carlo 法大为缩短, 具体与计 VQ 聚类阈值 ε 取值有关: ε 越小, 则聚类数越少, 计算时间越短。如当取 $\varepsilon=0.85$ 时, 若不考虑线路故障仅需要进行 16 次连续潮流计算, 耗时 0.056 min; 考虑线路故障时需要进行 16 次连续潮流计算和 1 646 次下降牛顿计算, 耗时 0.94 min, 完全可以满足在线计算需要。

由图 2、3 可以看出, 本文方法和标准 Monte Carlo 法得到的 TTC 概率密度函数同样非常接近, 这进一步验证了本文方法的正确性。

表 2 考虑风速变化、发电机出力、负荷波动不确定性的概率 TTC 计算结果

Tab. 2 Calculation results of TTC considering wind speed, generator outputs and load uncertainties

计算方法	聚类数	CPF 次数/次	计算时间/min	TTC 期望/MW	误差/%
标准 Monte Carlo	—	10 000	30.43	901.477 4	—
本	$\varepsilon=0.95$	281	0.847	902.001 3	0.058
文	$\varepsilon=0.90$	42	0.136	902.385 6	0.101
方	$\varepsilon=0.85$	16	0.056	903.051 8	0.175
法	$\varepsilon=0.80$	11	0.033	903.975 7	0.277

表 3 同时考虑风速变化、发电机出力、负荷波动和线路故障不确定性的概率 TTC 计算结果

Tab. 3 Calculation results of TTC considering wind speed, generator outputs, load and line contingencies uncertainties

计算方法	负荷聚类数	有故障线路样本数	CPF 次数	阻尼牛顿法计算次数	计算时间/min	TTC 期望/MW	误差/%
标准 Monte Carlo	—	1 646	10 000	0	31.91	893.441 6	—
本	$\varepsilon=0.95$	281	1 646	281	1.71	894.349 7	0.102
文	$\varepsilon=0.90$	42	1 646	42	1.01	894.703 1	0.141
方	$\varepsilon=0.85$	16	1 646	16	0.94	895.288 9	0.207
法	$\varepsilon=0.80$	11	1 646	11	0.88	896.194 6	0.308

4.2 风速概率分布参数对概率 TTC 的影响

风速 Weibull 分布参数 c 和 k 直接影响 Monte Carlo 仿真产生的风速样本, 从而影响概率 TTC 的分布。与 4.1 节算例条件相同, 风电场 WF1、WF2 分别接在 117 号节点和 23 号节点, VQ 聚类阈值 ε 取 0.85, 线路故障概率均取 0.001, 改变风速 Weibull 分布参数 c_1 、 k_1 、 c_2 、 k_2 , 分别计算概率 TTC 的期望值, 结果如表 4 所示。

从表 4 可以看出, TTC 期望随着尺度系数 c 的增大而明显增大。这是因为 c 代表风电场平均风速,

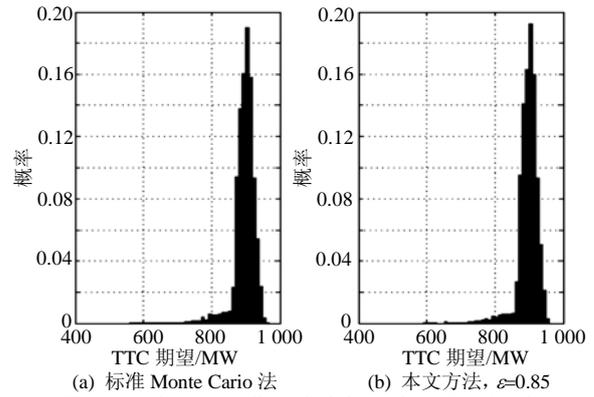


图 2 考虑风速变化、发电机出力、负荷波动不确定性的 TTC 概率密度

Fig. 2 Probability density function of TTC considering wind speed, generator outputs and load uncertainties

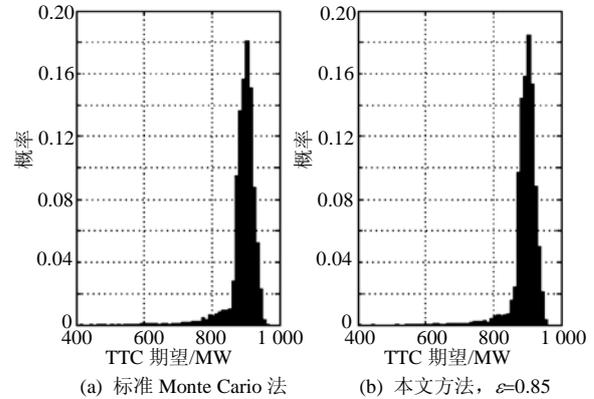


图 3 同时考虑风速变化、发电机出力、负荷波动和线路故障不确定性的 TTC 概率密度

Fig. 3 Probability density function of TTC considering wind speed, generator outputs, load and line contingencies uncertainties

它决定了风电场能够注入系统的平均功率的大小, 从而影响系统 TTC 期望值。形状系数 k 对 TTC 期望值影响较小, 并且随着 k 的增大, TTC 期望有可能增加, 也可能减小。

为了进一步研究形状系数 k 对 TTC 概率分布的影响, 图 5 给出了不同 k 参数情况下的 TTC 概率密度分布。从图 5 可以看出, 形状系数 k 对 TTC 概率密度分布有较大影响。这是因为 k 代表风速 Weibull 分布的形状, 它决定了各样本风速距离平均风速的分散程度, 所以 k 主要是对 TTC 的概率密度分布产

生影响。

因此，在包含大型风电场的电力系统中，准确获取风电场风速概率分布参数是准确计算概率 TTC 的前提。在对风速概率分布参数的研究中，文献[15, 21-22]做出了很有价值的工作。此外，不同风电场的风速分布并不是孤立的，而是存在一定关联性，文献[3]给出了采用矩阵变换技术考虑风电场风速关联特性的 Monte Carlo 仿真方法。总之，进一步提高风电场风速仿真的精度是提高概率 TTC 计算准确度的关键。

表 4 不同风速概率分布参数条件下的概率 TTC 计算结果
Tab. 4 Calculation results of TTC under different probability distribution parameters of wind speed

c_1	c_2	k_1	k_2	TTC 期望/MW
4	4.5	2	2	885.464 0
7	8	2	2	890.839 9
12	13	2	2	896.501 2
7	8	1.8	1.8	890.849 0
7	8	2.1	2.1	891.704 8
7	8	2.3	2.3	890.380 3

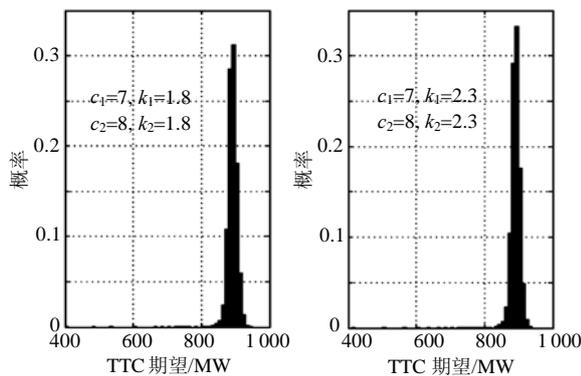


图 5 不同 k 参数条件下的 TTC 概率密度

Fig. 5 Probability density function of TTC under different k parameter

5 结论

在文献[10-12]的基础上建立了加入异步风力发电机模型后的系统含参潮流模型，推导出含风电场注入功率项的全注入空间静态电压稳定域边界局部切平面解析式，在此基础上提出了将 Monte Carlo 仿真和电压稳定域方法相结合的综合考虑风电场风速、负荷、发电机出力及设备故障不确定性因素的概率 TTC 分层快速计算方法。利用所提出的方法，进一步分析了风速概率分布参数对系统 TTC 的影响，指出准确获取风电场风速分布参数、进一步提高风速仿真精度是准确计算概率 TTC 的前提。

参考文献

- [1] 陈金富, 陈海焱, 段献忠. 含大型风电场的电力系统多时段动态优化潮流[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(3): 31-35.
Chen Jinfu, Chen Haiyan, Duan Xianzhong. Multi-period dynamic optimal power flow in wind power integrated system[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(3): 31-35(in Chinese).
- [2] 陈树勇, 申洪, 张洋, 等. 基于遗传算法的风电场无功补偿及控制方法的研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(8): 1-6.
Chen Shuyong, Shen Hong, Zhangyang, et al. Researches on the compensation and control of reactive power for wind farms based on genetic algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(8): 1-6(in Chinese).
- [3] 王海超, 鲁宗相, 周双喜. 风电场发电容量可信度研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(10): 103-106.
Wang Haichao, Lu Zongxiang, Zhou Shuangxi. Researche on the capacity credit of wind energy resources[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(10): 103-106(in Chinese).
- [4] 郑国强, 鲍海, 陈树勇. 基于近似线性规划的风电场穿透功率极限优化的改进算法[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(10): 68-71.
Zheng Guoqiang, Bao Hai, Chen Shuyong. Amending algorithm for wind farm penetration optimization based on approximate linear programming method[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(10): 68-71(in Chinese).
- [5] 雷亚洲, 王伟胜, 印永华, 等. 含风电场电力系统的有功优化潮流[J]. 电网技术, 2002, 26(6): 18-21.
Lei Yazhou, Wang Weisheng, Yin Yonghua, et al. Optimal real power flow in wind power integrated system[J]. Power System Technology, 2002, 26(6): 18-21(in Chinese).
- [6] 申洪, 梁军, 戴慧珠. 基于电力系统暂态稳定分析的风电场穿透功率极限计算[J]. 电网技术, 2002, 26(8): 8-11.
Shen Hong, Liang Jun, Dai Huizhu. Calculation of wind farm penetration based on power system transient stability analysis [J]. Power System Technology, 2002, 26(8): 8-11 (in Chinese).
- [7] NERC. Available transfer capability definition and determination: a reference document prepared by TTC task force[R]. New Jersey: North American Electric Reliability Council, 1996.
- [8] 李国庆, 赵钰婷, 王利猛. 计及统一潮流控制器的可用输电能力的计算[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(9): 44-49.
Li Guoqing, Zhao Yuting, Wang Limeng. Available transfer capability calculation with unified power flow controller[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(9): 44-49(in Chinese).
- [9] Kulyos Audomvongseeree, Akihiko Yokoyama. Consideration of an appropriate TTC by probabilistic approach[J]. IEEE Trans. on Power Systems, 2004, 19(1): 375-383
- [10] 王成山, 王兴刚. 考虑静态电压稳定约束并计及负荷、发电机出力不确定性因素的概率 TTC 快速计算[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(16): 46-51.
Wang Chengshan, Wang Xinggang. Fast calculation of probabilistic total transfer capability considering static voltage stability constraints and the uncertainties of load and generator output[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(16): 46-51(in Chinese).
- [11] Yu Yixin. Security region of bulk power system[C]. 2002 International Conference on Power System Technology Proceedings, Kunming, China, 2002.
- [12] 王成山, 王兴刚. 考虑静态电压稳定约束并计及设备故障概率的

- TTC 快速计算[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(19): 7-12.
Wang Chengshan, Wang Xinggang. Fast calculation of probabilistic total transfer capability considering static voltage stability constraints and the probability of device contingencies[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(19): 7-12(in Chinese).
- [13] 王成山, 许晓菲, 余贻鑫, 等. 电力系统电压稳定域的局部可视化描述及其应用[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(3): 1-5.
Wang Chengshan, Xu Xiaofei, Yu Yixin, et al. Visualization of part of the static voltage stability region in power system and its application [J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(3): 1-5(in Chinese).
- [14] Chou K C, Corotis R B. Simulation of hourly wind speed and array wind power[J]. Solar Energy, 1981, 26(3): 199-212.
- [15] 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): 109-110.
Ding Ming, Wu Yichun, Zhang Lijun. Study on the algorithm to the probabilistic distribution parameters of wind speed in wind farms [J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(10): 109-110(in Chinese).
- [16] 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 Yichun, Ding Ming. Reliability assessment of wind power generation system based on Monte-Carlo simulation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2004, 24(12): 70-73(in Chinese).
- [17] 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.
- [18] Feijoo A E, Cidras J, Dornelas J L G. Wind speed simulation in wind farms for steady-state security assessment of electrical power systems [J]. IEEE Trans on Energy Conversion, 1999, 14(4): 1582-1588.
- [19] 吴俊玲, 周双喜. 并网风力发电场的最大注入功率分析[J]. 电网技术, 2004, 28(20): 28-32.
Wu Junling, Zhou Shuangxi. Analysis on maximum power injection of wind farm connected to power system[J]. Power Systems Technology, 2004, 28(20): 28-32(in Chinese).
- [20] 吴义纯, 丁明, 张力军. 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).
- [21] Feijoo AE, Cidras J, Dornelas J L G. Wind speed simulation in wind farms for steady-state security assessment of electrical power systems [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 1999, 14(4): 1582-1588.
- [22] 吴学光, 陈树勇, 戴慧珠, 等. 最小误差逼近法在风电场风能资源特性分析中的应用[J]. 电网技术, 1998, 22(7): 69-74.
Wu Xueguang, Chen Shuyong, Dai Huizhu, et al. Application of least error approach to analysis of wind energy resource in wind farm [J]. Power System Technology, 1998, 22(7): 69-74(in Chinese).

收稿日期: 2007-10-16。

作者简介:

王成山(1962—), 男, 长江学者特聘教授, 博士生导师, 主要从事电力系统安全性分析、分布式发电系统运行与控制、城市电力系统规划的研究工作, cswang@tju.edu.cn;

王兴刚(1979—), 男, 博士研究生, 主要研究方向为电力系统安全性与稳定性;

孙玮(1982—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统安全性与稳定性。

(责任编辑 王剑乔)