

风电并网系统区域间概率可用输电能力计算

陈厚合, 李国庆, 张芳晶

(东北电力大学, 吉林 吉林 132012)

摘要: 为了准确评估风电场接入电网对系统可用输电能力(Available Transfer Capability, ATC)的影响, 针对风电并网系统的概率可用输电能力计算展开研究, 详细分析不同风电并网情况下 ATC 的变化规律。首先基于风速 Weibull 分布, 建立了大型风电场输出功率数学模型; 进而采用原-对偶内点法完成风电并网系统可用输电能力单一样板值的求解。在此基础上, 采用蒙特卡罗仿真法从广义角度对风电并网系统的 ATC 进行概率评估。仿真结果表明, 所提算法能够有效评估风电这种波动性电源对 ATC 的影响。研究成果可为风电并网系统安全经济性评估提供有效参考信息, 对未来电网规划扩建具有指导意义。
关键词: 电力系统; 风电场; 可用输电能力; 蒙特卡罗仿真; 原对偶内点法

Calculation of probabilistic available transfer capability of wind farm incorporated system

CHEN Hou-he, LI Guo-qing, ZHANG Fang-jing

(Northeast Dianli University, Jinlin 132012, China)

Abstract: In order to accurately assess the effect of wind farms on the available transfer capability (ATC), probabilistic available transfer capability of wind farm incorporated system is researched, and the change law of ATC with different wind farm incorporated system is analyzed in detail. First, the mathematical model of large scale wind farm is established based on the Weibull model of wind speed. Then, primal-dual interior point method is used to calculate the value of ATC in certain system operation mode. Finally, ATC probability assessment of wind power integrated system is achieved by Monte-carlo simulation method in a broad perspective. The simulation results show that the proposed algorithm can effectively assess the influence of wind farms to ATC, which has guiding functions for future expansion of the power grid and can provide effective reference information for the safety and economics evaluation of the system with wind farms.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51377016).

Key words: power system; wind farm; available transfer capability; Monte-carlo simulation; interior-point algorithm

中图分类号: TM76 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)21-0059-07

0 引言

风能是当前世界上最具大规模商业化开发潜力的可再生能源, 风电并网运行是大规模利用风能的最重要途径^[1-2]。然而, 由于风能所特有的随机性、间歇性和波动性特点, 受自然风力驱动的风电机组输出功率难以日前调度, 这给互联系统区域间输电能力(Available Transfer Capability, ATC)计算和分析带来了新的困难。因此, 在大规模风电集中并网条件下, 如何准确地把握风电接入对系统区域间可用输电能力的影响, 在系统安全可靠运行极限的范围内, 尽可能地满足用电负荷的电力需求, 对维

持电力市场的正常运营及电力系统的安全稳定运行有着重要的意义。

可用输电能力是反映电网安全稳定裕度并确保电力市场交易顺利进行的重要指标^[3]。其现有的研究方法可分为两类: 基于概率的求解方法和确定性的求解方法^[4-5]。基于概率性的求解方法能够全面地描述不确定性因素影响下的电网输电能力, 从而得到各种反映 ATC 充裕度统计指标及其概率分布的曲线, 是系统长期规划研究的有效工具^[6]; 确定性的求解方法是概率方法中单一样板的求解方法, 即采用优化技术或其他方法直接获得所描述问题的解^[7]。文献[8]以准确地计及系统中不确定性因素对 ATC 影响为目标, 提出了蒙特卡罗仿真结合线性规划的方法对 ATC 进行概率评估的思想, 准确地模

基金项目: 国家自然科学基金项目(51377016)

拟了系统各种可能出现的运行状态,详细地分析了系统中不确定因素(系统元件故障、负荷波动等)对电网可用输电能力计算的影响。

随着我国风电并网规模的不断扩增,电网风电穿透功率的不断增大,风电输出的不确定性也成为影响 ATC 的一个重要因素。一些学者已经展开关于风电并网条件下的电力系统区域间可用输电能力的探索研究工作,文献[9-10]建立了加入异步风力发电机模型的含参潮流模型,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,着重分析了风速概率分布参数对 TTC 的影响;文献[11]采用 ARMA 时间序列模型模拟风速,采用序贯蒙特卡罗仿真的方法对包含风电场的 ATC 进行概率评估,对抽样状态的 ATC 采用关键约束下的连续潮流来计算;文献[12]建立了大型风电场经 VSC-HVDC 并网的 ATC 计算模型,分析了 VSC 控制策略,采用 weibull 分布模拟风速,通过连续潮流法完成风电并网系统 ATC 的确定性计算。

本文首先对风电场输出功率波动特性进行分析,建立了大型风电场输出功率数学模型;进而通过原-对偶内点法完成风电并网系统可用输电能力单一样本值的求解;在此基础上,综合考虑风电出力随机性、发输电元件随机故障、负荷波动性和发电调度的不确定性等因素,采用非序贯蒙特卡罗仿真法对风电并网系统的 ATC 进行概率评估,建立了包括 ATC 期望、方差、最大值、最小值、风险概率和风电影响因子等在内的一系列评估指标,详细分析了不同风电并网情况下系统可用输电能力的变化规律。

1 风电场出力模型

1.1 风速模型

威布尔分布模型是国际上使用最多的风速分布模型,大量实测数据表明,很多地区的风速特征都可以用两参数威布尔分布体现^[13],其概率密度函数和概率分布函数可以描述为

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

$$F(v) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right] \quad (2)$$

式中: v 为风速; k 为形状系数,取值范围为 1.5 ~ 2.5; c 为尺度系数,表示该地区的平均风速,取值一般在 5~10 m/s。

设 x 是 $[0, 1]$ 上服从均匀分布的随机变量,令 $x = F(v)$, 对风速概率分布函数 $F(v)$ 进行反变换,推

得公式如式(3)。

$$v = c[-\ln(1-x)]^{1/k} \quad (3)$$

由于 x 和 $1-x$ 都是在 $[0, 1]$ 上均匀分布的随机变量,用 x 代替 $1-x$, 即可得到风速发生器模型,进而产生风速样本。

$$v = c(-\ln x)^{1/k} \quad (4)$$

1.2 风电机组出力模型

风电机组的输出功率主要取决于风速 v 的大小,二者之间的关系曲线即为风机的功率-风速特性曲线^[14],该曲线可以由式(5)所示的分段函数表示。

$$P_w(v) = \begin{cases} 0 & 0 \leq v \leq v_{ci}, v \geq v_{co} \\ P_R(A + B \times v + C \times v^2) & v_{ci} \leq v \leq v_{co} \\ P_R & v_R \leq v \leq v_{co} \end{cases} \quad (5)$$

式中: v 为风机轮毂高度处的风速; v_{ci} 为切入风速; v_{co} 为切出风速; v_R 为额定风速; P_R 为额定输出功率。当风速高于 v_{ci} 时,风机启动并网运行;当风速大于 v_{co} 时,风机保持额定功率输出;当风速低于 v_{ci} 或高于 v_{co} 时,风电机组停机并从电网解列出来。式(5)中 A 、 B 、 C 为模型参数,表达式如式(6)。

$$\begin{cases} A = \frac{1}{(v_{ci} - v_R)^2} \left[v_{ci}(v_{ci} + v_R) - 4v_{ci}v_R \left(\frac{v_{ci} + v_R}{2v_R}\right)^3 \right] \\ B = \frac{1}{(v_{ci} - v_R)^2} \left[4(v_{ci} + v_R) \left(\frac{v_{ci} + v_R}{2v_R}\right)^3 - (3v_{ci} + v_R) \right] \\ C = \frac{1}{(v_{ci} - v_R)^2} \left[2 - 4 \left(\frac{v_{ci} + v_R}{2v_R}\right)^3 \right] \end{cases} \quad (6)$$

当风电机组额定功率 P_R 为 1.5 MW, 切入风速 v_{ci} 取 4 m/s, 切出风速 v_{co} 取 25 m/s, 额定风速 v_R 取 13 m/s 时,风力发电机组的功率-风速关系曲线如图 1 所示。

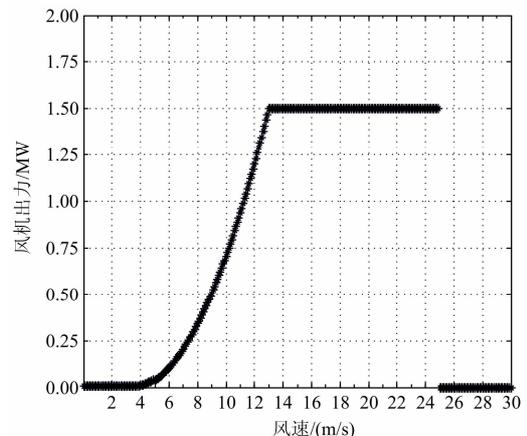


图 1 风力发电机功率-风速关系曲线

Fig. 1 Curve of wind turbine's outputs wind speed

1.3 风电场出力模型

本文以单台机组输出功率特性的线性放大来等效整个风电场出力特性的基础上, 综合考虑尾流效应与风电机组故障检修对风电场输出功率的影响, 得到风电场的整体输出功率如式(7)所示。

$$P_{wf} = k_{wake} \sum_{i=1}^{NT} x_i P_{wi} \quad (7)$$

式中: K_{wake} 为尾流效应系数, 此处取典型值 10%; x_i 为风机状态, 正常工作时为 1, 故障或检修时为 0; P_{wi} 为单台风电机组的输出功率; NT 为风电场内风电机组的个数。

目前我国风电场应用比较广泛的风力发电机有普通异步电机、双馈异步电机和直驱永磁同步电机。普通异步电机是我国风电场最早采用的机型, 在现有的风电场中也占有一定的比例, 其结构简单, 不具备无功调节能力, 但可以通过风电场配置的无功补偿设备来保证无功功率的平衡。双馈感应风力发电机组和直驱永磁同步电机占据新增机组的很大比例, 具有灵活的无功调节能力, 可保持并网点功率因数恒定。因此, 在进行稳态分析时风电场能够按着系统操作人员给定的功率因数运行, 因此本文将风电场视为恒功率因数方式下的 PQ 节点。

2 基于蒙特卡罗法的ATC概率计算

2.1 电力系统状态确定

电力系统的运行状态是系统内所有设备状态的组合, 且每一个设备的状态可由设备出现在该状态的概率进行抽样来确定^[15]。因此, 本文主要分析以下几种不确定因素的概率分布规律, 进而确定系统的运行状态。

(1) 系统中的常规发电机组、风电机组和输电线路有故障和运行两种运行状态, 其概率分布函数服从两点分布, 如式(8)所示。

$$x_k = \begin{cases} 1, & A_k > \lambda_k \\ 0, & 0 \leq A_k \leq \lambda_k \end{cases} \quad (8)$$

其中: x_k 为发电机或线路的运行状态, 1 代表该元件正常运行, 0 代表退出运行; A_k 是在 $[0, 1]$ 间抽取的随机变量, 若 A_k 小于指定的故障率 λ_k , 则此时该元件故障, 若 A_k 大于故障率 λ_k , 则元件正常运行。

(2) 对于负荷及常规发电机出力的波动, 认为其服从正态分布 $N(\mu, \sigma^2)$ 的规律。其中, μ 为节点负荷或发电机出力的预测值; 参数 σ^2 一般根据经验值给定, 它代表了系统实际负荷值或发电机出力值偏离给定值 μ 的大小。

(3) 对于风电场出力的不确定性, 假定风速服从 weibull 分布, 根据式(5)、式(7)确定风电场随机

出力。

2.2 基于原-对偶内点法的 ATC 计算模型

(1) 目标函数

本文 ATC 采用最优潮流进行求解^[16], 目标函数为区域间 A、B 间联络线在基态潮流的基础上, 可进一步传输的最大电能, 如式(9)所示。

$$\max F = \max[(1-k) \sum_{i \in A, j \in B} (P_{ij} - P_{ij}^0)] \quad (9)$$

式中: A 为送电区域; B 为受电区域; P_{ij} 为从节点 i 到节点 j 的线路传输的有功功率; 上标“0”代表基态值; k 表示容量效益裕度 CBM 大小, 取值 5%。

(2) 等式约束条件

等式约束为系统常规潮流方程约束。

$$\begin{cases} \Delta P = P_{gi} + P_{Gi} - P_{Di} - U_i \sum_{j \in I} U_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) = 0 \\ \Delta Q = Q_{gi} + Q_{Gi} - Q_{Di} - U_i \sum_{j \in I} U_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} + B_{ij} \cos \theta_{ij}) = 0 \\ Q_{gi} = P_{gi} \sqrt{\alpha_i^2 / (1 - \alpha_i^2)} \end{cases} \quad (10)$$

式中: P_{Li} 、 Q_{Li} 为节点 i 的负荷; P_{gi} 、 Q_{gi} 为风电机组有功/无功发电容量; P_{Gi} 、 Q_{Gi} 为常规发电机组有功/无功发电容量; U_i 、 U_j 分别为节点 i 和 j 的电压幅值; θ_{ij} 为节点 i 和 j 电压的相位差; G_{ij} 和 B_{ij} 为节点导纳阵中的元素; α_i 为风电场输出的功率因数。

(3) 不等式约束条件

不等式约束条件主要包含发电机出力约束、热稳定约束、节点电压约束和负荷出力约束等, 相应的数学表达形式如式(11)。

$$\begin{cases} P_{Gi \min} \leq P_{Gi} \leq P_{Gi \max}, & i \in S_G \\ Q_{Gi \min} \leq Q_{Gi} \leq Q_{Gi \max}, & i \in S_G \\ P_{gi}^{\min} \leq P_{gi} \leq P_{gi}^{\max}, & i \in S_g \\ U_{i \min} \leq U_i \leq U_{i \max}, & i \in S_N \\ P_{Li}^0 \leq P_{Li} \leq P_{Li}^{\max}, & i \in S_L \\ Q_{Li}^0 \leq Q_{Li} \leq Q_{Li}^{\max}, & i \in S_L \\ P_{ij \min} \leq P_{ij} \leq P_{ij \max}, & i \in S_{CL} \end{cases} \quad (11)$$

式中: S_L 是受电区的所有负荷节点集合; S_G 和 S_g 分别是送电区的所有常规机组节点集合和风电场节点集合; S_{CL} 为线路集合; S_N 为总节点集合; P_{ij} 对应线路有功潮流; 变量上角标“0”、“min”、“max”分别表示基态潮流中的值、变量的下限和上限值。

2.3 ATC 概率评估指标

为研究风电并网对系统 ATC 的影响, 利用统计分析的方法, 求取下列 ATC 概率统计指标和风险指

标, 以便定量分析电网的可用输电能力。

1) ATC 最大值

$$ATC_{\max} = \max\{ATC(x_i), i \in N\} \quad (12)$$

2) ATC 最小值

$$ATC_{\min} = \min\{ATC(x_i), i \in N\} \quad (13)$$

3) ATC 期望值

$$E_{ATC} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N ATC(x_i) \quad (14)$$

4) ATC 方差

$$V_{ATC} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \{ATC(x_i) - E_{ATC}\}^2 \quad (15)$$

5) ATC 变异系数

$$\beta = \frac{\sqrt{V_{ATC}(T)}}{E_{ATC}(T)} \quad (16)$$

6) ATC 等于零的概率

$$P_{ATC=0} = \frac{N_{ATC=0}}{N} \quad (17)$$

7) ATC 概率密度

输电能力概率密度是指, 在蒙特卡罗模拟中, 某一ATC值出现的次数 N_{ATC} 与抽样总次数 N 的比值。

$$P_{ATCi} = \frac{N_{ATCi}}{N} \quad (18)$$

8) ATC不足概率

输电能力不足概率是对概率密度函数的积分, 表示ATC值小于等于某一设定ATC值的累积概率, 也称为风险概率。

$$P_{\text{risk}} = \frac{N[ATC_i < ATC_c]}{N} \quad (19)$$

9) 风电影响因子

风电场影响因子表示风电接入对 ATC 风险概率的影响, $N_p[ATC_i < ATC_c]$ 表示无风场时的 ATC 的值小于特定值的仿真次数, $N_q[ATC_i < ATC_c]$ 表示加入风场后 ATC 的值小于特定值的抽样次数。

$$P_{\text{wind}} = \frac{N_p[ATC_i < ATC_c] - N_q[ATC_i < ATC_c]}{N} \quad (20)$$

2.4 基于蒙特卡罗法的 ATC 计算流程

基于非序贯蒙特卡罗法的 ATC 评估流程如下所示。

1) 输入系统中发电机、线路、负荷以及风电场的相关参数, 形成系统的基本信息。

2) 确定最大抽样次数。

3) 采用蒙特卡罗法对系统各种不确定因素进行随机抽样, 包括风电场出力、常规发电机出力波

动、负荷出力波动及发输电元件随机故障等。

4) 针对每次抽样得到的系统状态, 若系统出现了系统解列(孤岛运行)、或发电量与负荷量不匹配的情况, 则认为此种情况下的 ATC 值为零, 返回步骤 3), 重新抽样; 如果系统能够正常运行, 则继续下一步。

5) 对于可行的结构, 采用原-对偶内点法对单一样板情况下的可用输电能力进行求解; 若抽样次数 k 小于指定抽样次数 N , 则返回到步骤 3), 为下一次抽样做准备。

6) 若达到了指定抽样次数, 则记录 ATC 相关数据, 并计算其概率评估指标。

3 算例分析

为验证所建立 ATC 计算模型及采用优化算法的正确性和有效性, 本文采用 Matlab 语言实现本课题算法, 对 IEEE-30 节点系统进行仿真分析, 网络相关参数详见文献[17]。IEEE-30 节点系统是电力系统研究领域广泛应用的标准测试系统之一, 共有 6 台发电机, 41 条线路, 划分为 3 个区, 系统网络连接线如图 2 所示。其中, 风电场的相关参数见表 1, 此时假定风速服从尺度参数为 10、形状参数为 2 的双参数 Weibull 分布; 蒙特卡罗抽样过程中的不确定因素参数设置如表 2 所示。设定抽样次数为 5 000 次, 采用标么值进行计算, 基准容量取 100 MW。

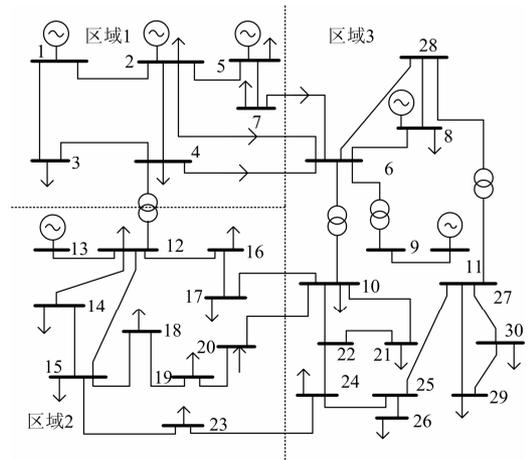


图 2 IEEE30 节点系统结构图

Fig. 2 Structure of IEEE30 node system

表 1 风场相关参数

Table 1 Parameters of wind farm

NT	P_R/MW	$u_{ci}/$ (m/s)	$u_{co}/$ (m/s)	$u_{R}/$ (m/s)	$\cos\phi$
20	1.5	4	25	13	0.96

表 2 蒙特卡罗抽样过程中系统参数

支路	常规发电机组	风电机组	发电机、负荷
故障率	故障率	故障率	波动
$\lambda_k = 0.001$	$\lambda_k = 0.001$	$\lambda_k = 0.01$	$\sigma^2 = 0.02$

根据风电场并网条件的不同, 大型风电场对 ATC 的影响呈现出不同的特点。本文着重评估风电场的出力的随机性和波动性对 ATC 的影响, 分以下五种情况对比研究。

1) 案例 1 是原系统总装机容量不变, 无风电场的情况;

2) 案例 2 是在送电区域节点 5 并入一个容量为 20×1.5 MW 的风场;

3) 案例 3 是在送电区域节点 5 并入两个容量为 20×1.5 MW 的风场;

4) 案例 4 是在受电区域节点 8 并入一个容量为 20×1.5 MW 的风场;

5) 案例 5 是在送电区域节点 5 直接并入一个容量为 30 MW 火电厂。

分别对以上五种情况下的 ATC 进行统计分析, 得到 ATC 的各项概率指标如表 3 所示。此时在计算 ATC 不足概率 P_{risk} 时, 设定 ATC 指定值的大小为基态潮流下的可用输电能力值 79.73 MW。

表 3 五种风电并网条件下 ATC 统计指标对比

评估指标	方案 1	方案 2	方案 3	方案 4	方案 5
E_{ATC}/MW	67.30	71.59	77.15	74.28	73.15
V_{ATC}	7.13	8.83	9.57	9.31	7.39
β	0.038	0.041	0.040	0.042	0.037
$ATC_{\text{min}}/\text{MW}$	0	0	0	0	0
$ATC_{\text{max}}/\text{MW}$	93.99	111.02	123.38	115.38	116.23
P_{ATC0}	0.001 2	0.002 4	0.002 2	0.002 7	0.001 7
P_{risk}	0.817 4	0.574 1	0.388 2	0.448 6	0.436 2
P_{wind}	-	0.243 3	0.429 2	0.368 8	0.381 2

(1) 方案 1、方案 2 和方案 3 的对比分析体现了风电场装机容量的变化对 ATC 的影响, 其概率密度分布曲线和累积分布曲线, 如图 3、图 4 所示。

通过对以上 ATC 各项指标的对比分析, 可以得出如下结论:

a) 风电场接入系统后, ATC 的期望值增大了, 而且随着风电场容量的增加, ATC 期望值有增大的趋势, 这说明风电场并网能够提高系统的可用输电能力值。但由于受到输电线路热容量的限制, 系统 ATC 增大数值并不与风电场容量成正比关系, 且当

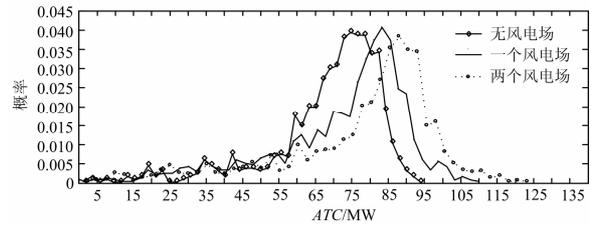


图 3 不同并网风电场容量下的 ATC 概率密度分布曲线
Fig. 3 Probability density distribution curves of ATC for different capacity of wind farm

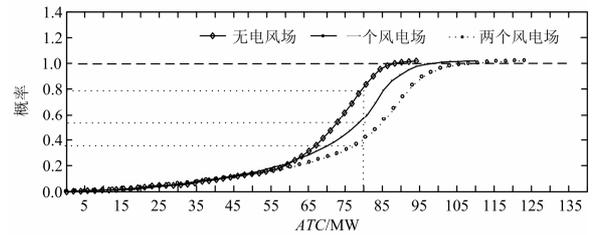


图 4 不同并网风电场容量下的 ATC 累积分布曲线
Fig. 4 Cumulative distribution curves of ATC for different capacity of wind farm

风电场装机容量超过一定值后, ATC 值将不会再随之增大。

b) 风电场并网将导致 ATC 的方差增大, 系统的波动性增强, 这是由于风电功率的随机性和间歇性使系统的不确定因素增多的原因, 风电并网容量越大, ATC 值的波动幅度就越强。此时变异系数 β 的变化则说明了风电并网影响了 ATC 计算精度。

c) 由表 3 或图 4 都可以看出, 随着风电并网容量的增大, 系统 ATC 不足概率 P_{risk} 逐渐减少, 说明风电并网后虽然引起 ATC 的波动程度, 但也一定量地提高了系统 ATC 值。同时, 随着风电并网容量的提升, 风电影响因子 P_{wind} 对电网的影响也不断增大, 这也说明了风电并网在一定程度上减小了 ATC 风险概率, 提高了系统的可靠性。

(2) 方案 2 和方案 4 的对比分析体现了风电场并网位置的变化对 ATC 的影响。其概率密度分布曲线和累积分布曲线, 如图 5、图 6 所示。

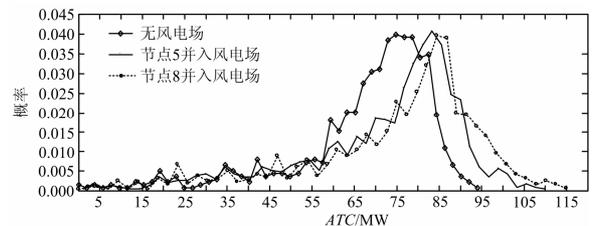


图 5 不同风电场并网位置时的 ATC 概率密度分布曲线
Fig. 5 Probability density distribution curves of ATC for different position of wind farm

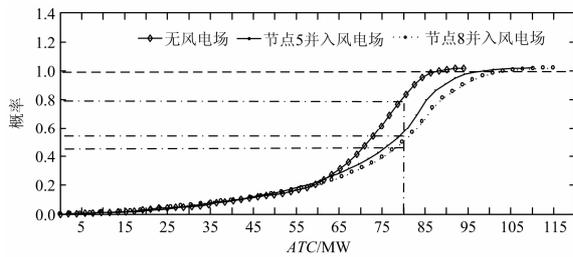


图 6 不同风电场并网位置时的 ATC 累积分布曲线

Fig. 6 Cumulative distribution curves of ATC for different position of wind farm

结果分析：风电场并入系统位置的不同对 ATC 各项概率指标有着不同的影响。与送电侧（节点 5）相比，在受电侧（节点 8）并入风电场，会令 ATC 的期望值增加效果明显，但是 ATC 的方差和风电影响因子的变化量也较大，这说明风电在受电侧并网时对系统可用输电能力的影响较大。因此，在系统规划时应该考虑在系统的送电侧进行风电并网，减少风电并网对可用输电能力的影响。

(3) 方案 2 和方案 5 表示相同容量的风电机组和火电机组并入系统的情况。其概率密度分布曲线和累积分布曲线，如图 7、图 8 所示。

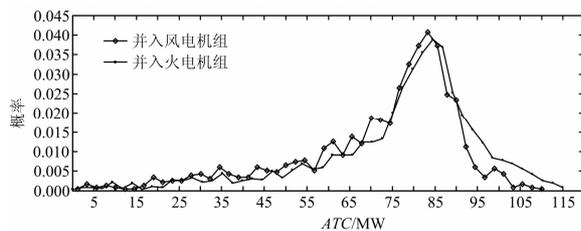


图 7 相同容量风电场和火电机组并网时 ATC 概率密度分布曲线

Fig. 7 Probability density distribution curves of ATC for the same capacity of wind power and thermal power plants

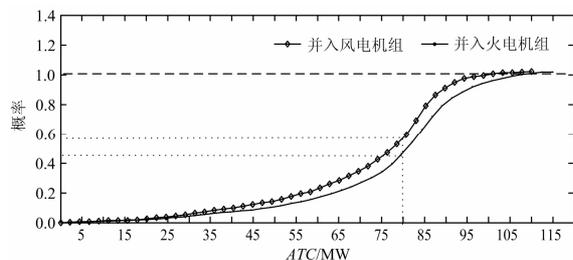


图 8 相同容量风电场和火电机组并网时 ATC 累积分布曲线

Fig. 8 Cumulative distribution curves of ATC for the same capacity of wind power and thermal power plants

结果分析：风电场或与其额定容量相等的火电机组接入节点 5 以后，系统的 ATC 期望值均增大，而且火电机组并网后 ATC 的增量要大于风电机组并网情况；同时，火电机组并网后系统 ATC 的方差、变异系数等均小于风电接入的情况，这体现了风电这

种波动性的电源特性，其可靠性低于常规发电机组。

4 结论

本文采用蒙特卡罗仿真法从广义的角度对风电并网后系统区域间的输电能力进行求解分析。研究了风速模型、尾流效应和风电机组有功出力三者的对应关系，建立了大型风电场输出功率数学模型；并通过原-对偶内点法完成风电并网系统可用输电能力单一样板值的求解；最后通过所建立的一系列可用输电能力评估指标详细分析了不同风电并网情况下系统可用输电能力的变化规律，对风电并网系统的运行规划具有一定的指导意义。

参考文献

- [1] 国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006~2020 年). [EB/OL]. <http://ghs.ndrc.gov.cn/ghwb/default.htm>. National medium and long-term plan for science and technology development (2006~2020)[EB/OL]. <http://ghs.ndrc.gov.cn/ghwb/default.htm>.
- [2] 李俊峰, 蔡丰波, 乔黎明, 等. 中国风电发展报告 2013 [M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2013. LI Jun-feng, CAI Feng-bo, QIAO Li-ming, et al. 2013 annual review and outlook on China wind power[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2013.
- [3] North American Electric Reliability Council (NERC). Available transfer capability definitions and determination[R]. 1996.
- [4] 陈厚合, 李国庆, 姜涛. 计及静态电压稳定约束的交直流系统可用输电能力[J]. 电网技术, 2012, 36(2): 75-81. CHEN Hou-he, LI Guo-qing, JIANG Tao. Available transfer capability of hybrid AC/DC power system considering constraint of static voltage stability[J]. Power System Technology, 2012, 36(2): 75-81.
- [5] 梁海峰, 郭然, 高亚静. 计及天气因素的风电并网系统可用输电能力评估[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(1): 164-168. LIANG Hai-feng, GUO Ran, GAO Ya-jing. Assessment on ATC of wind farm incorporated system considering weather[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(1): 164-168.
- [6] 崔雅莉, 别朝红, 王锡凡. 输电系统可用输电能力的概率模型及计算[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(14): 36-40. CUI Ya-li, BIE Zhao-hong, WANG Xi-fan. Study on probabilistic models and algorithms of available transfer capability[J]. Automation of Electric Power Systems,

- 2003, 27(14): 36-40.
- [7] 王艳玲, 韩学山, 周晓峰. 基于扩展潮流的输电断面最大传输能力[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(13): 20-24.
WANG Yan-ling, HAN Xue-shan, ZHOU Xiao-feng. The total transfer capability of cross-section of transmission line based on expanded power flow[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(13): 20-24.
- [8] 高雅静. 考虑不确定因素的电网可用输电能力的研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2007.
GAO Ya-jing. Research on available transfer capability considering uncertainties[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2007.
- [9] 王成山, 孙玮, 王兴刚. 含大型风电场的电力系统最大输电能力计算[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(2): 17-31.
WANG Cheng-shan, SUN Wei, WANG Xing-gang. Total transfer capability calculation of power system including large scale wind farm[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(2): 17-31.
- [10] 王成山, 王兴刚, 孙玮. 含大型风电场的电力系统概率最大输电能力快速计算[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(10): 56-62.
WANG Cheng-shan, WANG Xing-gang, SUN Wei. Fast calculation and analysis of probabilistic total transfer capability in power system including large-scale wind farms[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(10): 56-62.
- [11] 周明, 冉瑞江, 李庚银. 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. Assessment on available transfer capability of wind farm incorporated system[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(22): 14-21.
- [12] GAO Ya-jing, WANG Zhi, LIANG Hai-feng. Available transfer capability calculation with large offshore wind farms connected by VSC-HVDC[C] // Innovative Smart Grid Technologies-Asia (ISGT Asia) Conference, Tianjin, China, 1-6 May, 2012.
- [13] 钟浩, 唐民富. 风电场发电可靠性及容量可信度评估[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(18): 75-80.
ZHONG Hao, TANG Min-fu. Assessment on the reliability and capacity credibility of wind farms[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(18): 75-80.
- [14] 彭鹤, 谢开贵, 王进, 等. 含风力发电的发输配电系统可靠性综合评估[J]. 电气应用, 2009, 28(17): 44-49.
PENG Hu, XIE Kai-gui, WANG Jin, et al. Reliability assessment of generation and transmission systems considering wind farm effects[J]. Electrotechnical Application, 2009, 28(17): 44-49.
- [15] 王俊, 蔡兴国. 考虑分布式发电不确定性的可用输电能力评估[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(21): 21-25.
WANG Jun, CAI Xing-guo. Assessment of available transfer capability considering uncertainties distributed generator[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(21): 21-25.
- [16] CHUNG C Y, YAN Wei, LIU Fang. Decomposed predictor-corrector interior point method for dynamic optimal power flow[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2011, 26(3): 1030-1039.
- [17] 吴际舜, 侯志俭. 电力系统潮流计算的计算机算法[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2000.
WU Ji-shun, HOU Zhi-jian. Calculation algorithms of power system flow[M]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University Press, 2000.

收稿日期: 2014-01-27

作者简介:

陈厚合(1978-), 男, 博士研究生, 讲师, 主要从事电力系统安全性和稳定性分析的研究和教学工作; E-mail: chenhouhe_tju@163.com

李国庆(1963-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事电力系统安全性和稳定性分析、控制与决策、配电系统自动化的研究工作;

张芳晶(1988-), 女, 通讯作者, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统安全性和稳定性分析。E-mail: zhangfangjing074@126.com