

含大型风电场的电力系统最大输电能力计算

王成山, 孙 玮, 王兴刚

(天津大学电气与自动化工程学院, 天津市 300072)

摘要: 随着风力发电在世界范围内的迅速发展,越来越多的兆瓦级以上的大型风电场直接接入输电系统。在传统风电潮流计算 RX 模型的基础上,文中使用异步风力发电机 π 型等值电路建立了含异步风电机组的连续潮流计算模型。利用这一模型,针对含有大型风电场的输电系统,对其静态电压稳定约束条件下的最大输电能力(TTC)展开研究。计算结果表明:风速的变化将对系统 TTC 产生较大影响,并且随着风电穿透功率的增大,风速对系统 TTC 的影响更加显著。

关键词: 大型风电场; 异步发电机; 最大输电能力; 连续潮流

中图分类号: TM614; TM744

0 引言

传统的风力发电研究仅限于小型风力机组对配电系统影响的研究,但随着风力发电技术的飞速发展,特别是海上大型风电平台的建立,世界上总装机容量超过 10 MW 的大型风电场越来越多。以我国为例,在江苏省东台市一港,国华东台 200 MW 风电场正在建设中;单机 5 MW、总装机 100 MW 的广东汕头南澳海上风电场也已经投入建设。也就是说,未来几年内,将有越来越多的大型风电场直接连入输电系统,因此,有关大型风电场并网的相关研究工作越来越受到重视^[1-5]。

风速是不可控制的随机变量,它直接影响风电场的有功出力和无功吸收,从而对系统输电能力产生不可忽视的影响。最大输电能力(TTC)是指电力系统在满足一定的安全稳定约束条件下可以传输的最大功率,TTC 的计算是可用输电能力^[6]分析的基础和关键。在电压稳定约束下的 TTC 计算中,连续潮流(CPF)^[7]是常用的方法之一,它具有较高的计算稳定性和较快的收敛速度,并且能够得到精确的鞍型分叉点,从而可以利用鞍型分叉点的信息进行进一步的分析计算^[8]。

目前风力发电大多采用异步发电机,它在输出有功功率的同时还要从系统中吸收一定的无功功率来建立磁场,因而不能把它简单地视为电压幅值恒定的 PV 节点或者功率恒定的 PQ 节点^[9-10],必须建立适用于 CPF 计算的风力发电机静态模型。

文献[11]采用风电机组 PQ 模型进行潮流迭

代,该方法收敛速度较快,但是风电机组有功出力是根据风速事先给定并且在迭代过程中保持不变,因此存在一定的误差。文献[12]提出了 RX 模型,把风电机组用包含滑差变量的阻抗来等效,能够较好地反映风电机组的输出特性,但是由于需要交替计算系统潮流方程和风力机的滑差修正量,迭代次数多,收敛速度很慢。文献[13]针对文献[12]中的方法进行讨论,提出了在潮流计算中统一求解风力发电机滑差变量的思想。文献[14]使用简化异步电机模型对统一求解进行尝试,得到了较好的结果。

本文在文献[12-14]的基础上,使用异步发电机 π 型等值电路进行推导,建立了含异步风电机组的 CPF 计算模型,在保证计算精度的前提下大大提高了收敛速度。利用该模型,本文针对含有大型风电场系统的 TTC 进行分析计算,重点研究了风速变化对系统 TTC 的影响,并得出了有益的结论。

1 模型与计算方法

1.1 风力机模型

文献[12,14]给出风力机机械功率的表达式:

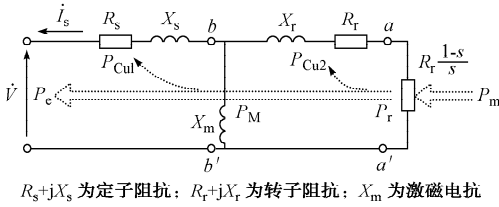
$$P_m = 0.5\rho A v^3 C_p \quad (1)$$

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有用风能的比例。

C_p 与尖速比 T_{tsr} 有关,可根据已有的实验数据用插值法来计算求得^[15-16]。 T_{tsr} 是叶轮尖的线速度与风速的比值, $T_{tsr} = \omega r / v$,其中, r 为叶片半径, ω 为风轮在风速为 v 时的旋转角速度。

1.2 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^[11]。



$R_s + jX_s$ 为定子阻抗; $R_r + jX_r$ 为转子阻抗; X_m 为激磁电抗

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

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 $R_r(1-s)/s$ 上的功率 P_r (s 为滑差, $s < 0$)。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 。

对图1中 bb' 右侧电路进行化简, 得到异步发电机的等值电路, 如图2所示。其中, $R_e(s) + jX_e(s)$ 是等效阻抗, 表达式如下:

$$R_e = \frac{X_m^2 \frac{R_r}{s}}{\left(\frac{R_r}{s}\right)^2 + (X_m + X_r)^2} \quad (2)$$

$$X_e = \frac{X_m^2 X_r + X_m X_r^2 + X_m \left(\frac{R_r}{s}\right)^2}{\left(\frac{R_r}{s}\right)^2 + (X_m + X_r)^2} \quad (3)$$

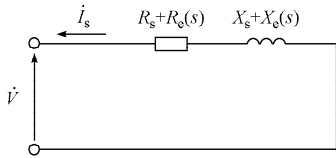


图2 简化了 bb' 右侧电路的异步发电机的等值电路

Fig. 2 Equivalent circuit of asynchronous generator by simplifying dextral circuit of bb'

由图2得到风电机组注入系统功率的表达式:

$$P_e(V, s) = \frac{-(R_s + R_e)V^2}{(R_s + R_e)^2 + (X_s + X_e)^2} \quad (4)$$

$$Q_e(V, s) = \frac{-(X_s + X_e)V^2}{(R_s + R_e)^2 + (X_s + X_e)^2} \quad (5)$$

式中: V 为风电场的出口电压。

对图1中 aa' 左侧电路进行戴维南等效, 得到异步发电机的等效电路, 如图3所示。其中, $R_1 + jX_1$ 是等效阻抗, V_1 是等效电压, 表达式如下:

$$R_1 = \frac{X_m^2 R_s}{R_s^2 + (X_s + X_m)^2} \quad (6)$$

$$X_1 = \frac{X_m R_s^2 + X_m X_s^2 + X_m^2 X_s}{R_s^2 + (X_s + X_m)^2} \quad (7)$$

$$V_1 = \frac{X_m}{R_s^2 + (X_s + X_m)^2} V \quad (8)$$

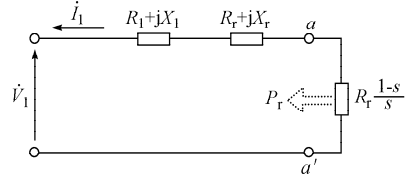


图3 简化了 aa' 左侧电路的异步发电机等效电路

Fig. 3 Equivalent circuit of asynchronous generator by simplifying left circuit of aa'

由图3可以得到发电机转子功率表达式:

$$P_r = \frac{V_1^2 R_r \frac{1-s}{s}}{\left(R_1 + \frac{R_r}{s}\right)^2 + (X_1 + X_r)^2} \quad (9)$$

1.3 含异步风电机组的 CPF 计算模型

常规潮流方程可用下式表示:

$$\begin{cases} P_{iG} - P_{iL} - V_i \sum_{j \in i} V_j (G_{ij} \cos \delta_{ij} + B_{ij} \sin \delta_{ij}) = 0 \\ -Q_{iL} - V_i \sum_{j \in i} V_j (G_{ij} \sin \delta_{ij} - B_{ij} \cos \delta_{ij}) = 0 \end{cases} \quad \begin{matrix} i \in N_B \\ i \in N_V \end{matrix} \quad (10)$$

式中: N_B 为不包含平衡节点的节点集合; N_V 为 PQ 节点集合; P_{iG} , P_{iL} , Q_{iL} 分别为发电机有功功率、负荷有功功率和负荷无功功率。

接入异步风电机组以后, 滑差 s 为新增状态变量, 因此必须增加一组平衡方程。当风速变化时, 风力机的机械功率 P_m 和异步发电机转子功率 P_r 随之变化, 系统达到稳态时, P_m 和 P_r 应该相等, 这就是一个新增的平衡方程。

设接有风电机组的节点集合为 N_w , 其中节点 i 的状态变量为 (V_i, θ_i, s_i) , 则节点 $i (i \in N_w)$ 对应的平衡方程为:

$$\begin{cases} f_{1i} = P_{ei}(V_i, s_i) - P_{iL} - V_i \sum_{j \in i} V_j (G_{ij} \cos \delta_{ij} + B_{ij} \sin \delta_{ij}) = 0 \\ f_{2i} = Q_{ei}(V_i, s_i) - Q_{iL} - V_i \sum_{j \in i} V_j (G_{ij} \sin \delta_{ij} - B_{ij} \cos \delta_{ij}) = 0 \\ f_{3i} = P_{mi} - P_{ri}(V_i, s_i) = 0 \end{cases} \quad (11)$$

文献[7]给出了采用局部电压参数化方法的常规 CPF 计算步骤:

1) 预测环节: 由当前点出发, 利用切线法预测出系统下一个解出现的方向。

2) 参数化过程: 利用局部参数化方法, 在步骤1计算出的切向量中选取电压幅值变化最快的节点。

3)步长控制:采用电压定步长下降控制法,电压下降步长一般取 0.005~0.020。

4)校正环节:采用定弧长校正,根据运行点的预测值,在保证连续性参数不变的情况下增加一维弧长公式。

加入风电机组后,含参潮流方程可以简写为:

$$f(\mathbf{V}, \boldsymbol{\theta}, \mathbf{s}, \lambda) = \mathbf{0} \quad (12)$$

式中: $\mathbf{V}$ 为节点电压幅值; $\boldsymbol{\theta}$ 为电压相角; $\mathbf{s}$ 为异步发电机滑差变量; λ 为系统负荷参数。

加入风电机组后,相对于上面给出的常规 CPF 计算步骤,参数化和步长控制这 2 步不需要进行修改,但预测环节和校正环节要做一些修改。

预测环节需改为对式(11)两边求导,按照下式计算切向量:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{J}_{f_1\theta} & \mathbf{VJ}_{f_1v} & \mathbf{J}_{f_1s} & \mathbf{J}_{f_1\lambda} \\ \mathbf{J}_{f_2\theta} & \mathbf{VJ}_{f_2v} & \mathbf{J}_{f_2s} & \mathbf{J}_{f_2\lambda} \\ \mathbf{J}_{f_3\theta} & \mathbf{VJ}_{f_3v} & \mathbf{J}_{f_3s} & \mathbf{J}_{f_3\lambda} \\ & \mathbf{e}_p^T & & \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d\boldsymbol{\theta} \\ \mathbf{V}^{-1}d\mathbf{V} \\ d\mathbf{s} \\ d\lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \\ \pm \frac{1}{V_p} \end{bmatrix} \quad (13)$$

式中:列向量 $\mathbf{e}_p \in \mathbf{R}^{N_B+N_V+1}$,除第 N_B+p 个元素为 1 外其他元素均为 0; p 指示连续性参数的位置,可取 1,2,..., N_V+1 。

由式(2)~式(11)可以推导出 $\mathbf{VJ}_{f_1v}$, $\mathbf{VJ}_{f_2v}$, $\mathbf{VJ}_{f_3v}$, $\mathbf{J}_{f_1s}$, $\mathbf{J}_{f_2s}$ 和 $\mathbf{J}_{f_3s}$ 的表达式。其中各子矩阵的非对角元素均为 0,对角元素的表达式如式(14)~式(19)。为简化,设

$$R = \frac{R_r}{s}$$

$$Z = \left(\frac{R_r}{s}\right)^2 + (X_m + X_r)^2$$

$$X = X_m^2 X_r + X_m X_r^2$$

则

$$[\mathbf{VJ}_{f_1v}]_{ii} = \frac{-2V_i^2(R_s + R_e)}{(R_s + R_e)^2 + (X_s + X_e)^2} + N_{ii} \quad (14)$$

$$[\mathbf{VJ}_{f_2v}]_{ii} = \frac{-2V_i^2(X_s + X_e)}{(R_s + R_e)^2 + (X_s + X_e)^2} + L_{ii} \quad (15)$$

$$[\mathbf{VJ}_{f_3v}]_{ii} = \frac{-2V_i X_m^2 R_r \frac{1-s}{s}}{R_s^2 + (X_s + X_m)^2} \quad (16)$$

$$[\mathbf{J}_{f_1s}]_{ii} = -\frac{R_r}{s^2} \left\{ V_i^2 \left(R_s + \frac{RX_m^2}{Z} \right) \left[2 \left(-\frac{2R^2 X_m^2}{Z^2} + \frac{X_m^2}{Z} \right) \left(R_s + \frac{RX_m^2}{Z} \right) + 2 \left(\frac{2RX_m}{Z} - \frac{2R(X + R^2 X_m)}{Z^2} \right) \left(\frac{X + R^2 X_m}{Z} + X_s \right) \right] \right\}$$

$$\left[\left(R_s + \frac{RX_m^2}{Z} \right)^2 + \left(\frac{X + R^2 X_m}{Z} + X_s \right)^2 \right]^{-2} - V_i^2 \left(-\frac{2R^2 X_m^2}{Z^2} + \frac{X_m^2}{Z} \right) \left[\left(R_s + \frac{RX_m^2}{Z} \right)^2 + \left(\frac{X + R^2 X_m}{Z} + X_s \right)^2 \right]^{-1} \right\} \quad (17)$$

$$[\mathbf{J}_{f_2s}]_{ii} = -\frac{R_r}{s^2} \left\{ V_i^2 \left(X_s + \frac{X + R^2 X_m}{Z} \right) \left[2 \left(-\frac{2R^2 X_m^2}{Z^2} + \frac{X_m^2}{Z} \right) \left(R_s + \frac{RX_m^2}{Z} \right) + 2 \left(\frac{2RX_m}{Z} - \frac{2R(X + R^2 X_m)}{Z^2} \right) \left(\frac{X + R^2 X_m}{Z} + X_s \right) \right] \right\} \quad (18)$$

$$[\mathbf{J}_{f_3s}]_{ii} = -\left\{ 2V_i^2 R_r \frac{X_m^2}{R_s^2 + (X_s + X_m)^2} (R_1 + R) \cdot \frac{1-s}{s^3} [(R_1 + R)^2 + (X_1 + X_r)^2]^{-2} - V_i^2 R_r \frac{X_m^2}{R_s^2 + (X_s + X_m)^2} \frac{1-s}{s^2} \cdot [(R_1 + R)^2 + (X_1 + X_r)^2]^{-1} - V_i^2 R_r \frac{X_m^2}{R_s^2 + (X_s + X_m)^2} s^{-1} [(R_1 + R)^2 + (X_1 + X_r)^2]^{-1} \right\} \quad (19)$$

式中: N_{ii} 和 L_{ii} 为常规潮流雅可比矩阵中 i 节点对角元素所对应的值,各发电机参数均略去下标 i 。

校正环节中,弧长校正公式^[7]应修改如下:

$$\sum_{j \in N_B} (V_j^1 - V_j^0)^2 + \sum_{j \in N_B} (\theta_j^1 - \theta_j^0)^2 + \sum_{j \in N_W} (s_j^1 - s_j^0)^2 + (\lambda^1 - \lambda^0)^2 - \left[\sum_{j \in N_B} (V_j^{(1)} - V_j^0)^2 + \sum_{j \in N_B} (\theta_j^{(1)} - \theta_j^0)^2 + \sum_{j \in N_W} (s_j^{(1)} - s_j^0)^2 + (\lambda^{(1)} - \lambda^0)^2 \right] = 0 \quad (20)$$

2 含大型风电场的电力系统 TTC 计算

下面以 IEEE 118 节点系统为例进行 TTC 分析计算。如图 4 所示,由虚线把整个系统分为区域 A 和区域 B。假定区域 B 为供电侧,区域 A 为受电侧。

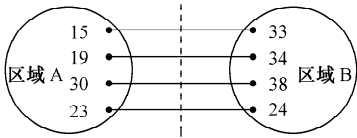


图 4 IEEE 118 节点系统分区

Fig. 4 Subarea diagram of IEEE 118-bus system

包含 100 台额定功率 600 kW 的异步风力发电机的风电场通过变压器和 110 kV 线路接在 117 号节点上,风电场数据如下: $\rho=1.224\ 5\ \text{kg/m}^3$; $V_N=0.69\ \text{kV}$; $A=184\ 0\ \text{m}^2$; $R_s=0.004\ 53\ \Omega$; $r=23\ \text{m}$; $X_s=0.050\ 70\ \Omega$; $v_{in}=3\ \text{m/s}$; $R_r=0.004\ 86\ \Omega$; $v_N=13.5\ \text{m/s}$; $X_r=0.149\ 10\ \Omega$; $v_{out}=20\ \text{m/s}$; $X_m=2.205\ 90\ \Omega$ 。风电机组机端装有分组投切的并联电容器,按照机组出力大小进行控制。

2.1 本文方法和 RX 方法的比较

分别利用文献[8]提出的 RX 模型和本文提出的异步风电机组 CPF 模型计算 TTC。使用 RX 模型进行 CPF 计算时,在每步计算过程中都需要对状态变量(V, θ, s)和异步电机滑差变量 s 进行交替迭代更新,并且随时修正风电节点的 RX 参数。采用 2 种模型的计算结果如表 1 所示。由表 1 可以看出,利用 2 种模型计算 TTC 的结果基本一致,但是 RX 模型迭代次数多,收敛速度慢,本文提出的包含滑差变量的 CPF 计算模型大大减少了每步迭代计算的时间,提高了收敛速度。

表 1 2 种模型的 TTC 和迭代次数

Table 1 TTC and iteration numbers with two models

风速/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	本文模型			RX 模型		
	迭代 步数	平均每 步迭代 次数	TTC/ MW	迭代 步数	平均每 步迭代 次数	TTC/ MW
4.0	9	10	876.317 7	11	26	876.320 3
7.0	9	10	891.767 3	11	31	891.770 8
10.0	10	11	903.809 3	12	40	903.781 4
13.5	10	11	929.596 4	12	45	929.613 5

2.2 风速变化对 TTC 的影响

自然界的风速是不可控的,风速大小直接影响风力机组的出力,对于含有大型风电场的系统,有必要研究风速改变对系统 TTC 的影响。将各包含 100 台异步风力发电机的 2 个风电场分别接在 117 号节点(风电场 1,风速为 v_1)和 26 号节点(风电场 2,风速为 v_2),进行不同风速情况下的 TTC 计算,风电机组功率因数均补偿至 0.94 以上^[17]。风电机组电压变化情况见图 5,输电能力的计算结果见表 2。

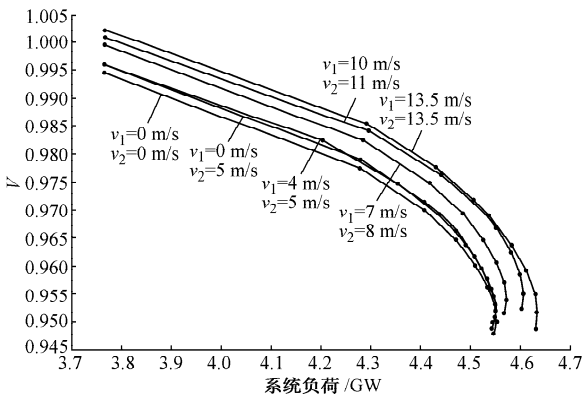


图 5 不同风速下风电机组机端电压的变化

Fig. 5 Voltage variation curve of wind turbine terminals under different wind speed

表 2 不同风速下的风力机械功率和系统 TTC

Table 2 Mechanical power of wind turbine and TTC under different wind speeds

风速/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)		风力机械功率/MW		TTC/MW
v_1	v_2	风电场 1	风电场 2	
0~3, ≥ 20	0~3, ≥ 20	0	0	855.163 6
4	0~3, ≥ 20	0.711 5	0	876.225 8
0~3, ≥ 20	5	0	2.672 5	878.223 7
4	5	0.711 5	2.672 5	880.304 1
7	8	12.026 5	18.390 0	905.545 5
10	11	34.207 5	40.258 5	945.136 2
13.5~20	13.5~20	59.920 0	59.920 0	986.649 3

由图 5 可以看出,在相同的负荷水平下,随着风速的增加,风电机组机端电压有所提高。从表 2 可以看出,当风速小于切入风速 3 m/s 或大于切出风速 20 m/s 时,风力机停止工作,风电机组从系统切除。在低风速条件下,TTC 可以提高 20 MW 以上;随着风速的增大,TTC 也随之增加,并且增加的幅度更大。当风速达到额定风速 13.5 m/s 时,风力机进入稳定工作状态,机械出力维持不变,TTC 提高了 130 MW 以上。因此,风速变化将对 TTC 产生显著影响。

比较表 1 和表 2 可以看出,同时接入 2 个风电场与只接入一个风电场相比,风速变化对 TTC 的影响更加显著。也就是说,随着风电穿透率(即风电装机容量占系统总负荷的比例^[18])的增长,风速的随机波动性对系统的影响将更为显著。因此,在包含大型风电场的电力系统中,调度员在计算可用输电能力时必须考虑到未来风速变化产生的影响,特别是要考虑到因为风速过低或过高导致风电机组被切除以后可用输电能力的显著变化。

3 结语

本文在异步风力发电机 π 型等值电路基础上,

建立了包含滑差变量的潮流计算模型和 CPF 计算模型,在保证计算精度的前提下提高了收敛速度。针对含有大型风电场的电力系统,对其静态电压稳定约束条件下的 TTC 展开研究,分析计算表明:风速变化对系统 TTC 影响显著,并且随着风电穿透功率的增大,这种影响更加显著。当风电机组正常工作时,系统 TTC 将随着风速的增大而提高;当由于风速过低或过高导致风电机组从系统切除时,系统 TTC 降低较多。总之,未来时刻风速的变化和风电穿透功率的增加都将对包含大型风电场的电力系统 TTC 产生显著影响。

参考文献

- [1] 雷亚洲. 与风电并网相关的研究课题. 电力系统自动化, 2003, 27(8): 84-89.
LEI Yazhou. Studies on wind farm integration into power system. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(8): 84-89.
- [2] 迟永宁, 王伟胜, 刘燕华, 等. 大型风电场对电力系统暂态稳定性的影响. 电力系统自动化, 2006, 30(15): 10-14.
CHI Yongning, WANG Weisheng, LIU Yanhua, et al. Impact of large scale wind farm integration on power system transient stability. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(15): 10-14.
- [3] 尹明, 李庚银, 周明, 等. 双馈感应风力发电机组动态模型的分析与比较. 电力系统自动化, 2006, 30(13): 22-27.
YIN Ming, LI Gengyin, ZHOU Ming, et al. Analysis and comparison of dynamic models for the doubly fed induction generator wind turbine. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(13): 22-27.
- [4] 陈海焱, 陈金富, 段献忠. 含风电场电力系统经济调度的模糊建模及优化算法. 电力系统自动化, 2006, 30(2): 22-26.
CHEN Haiyan, CHEN Jinfu, DUAN Xianzhong. Fuzzy modeling and optimization algorithm on dynamic economic dispatch in wind power integrated system. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(2): 22-26.
- [5] 刘其辉, 贺益康, 张建华. 交流励磁变速恒频风力发电机并网控制策略. 电力系统自动化, 2006, 30(3): 51-55.
LIU Qihui, HE Yikang, ZHANG Jianhua. Grid connection control strategy of AC-excited variable-speed constant-frequency wind-power generator. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(3): 51-55.
- [6] NERC. Available transfer capability definition and determination; reference document prepared by TTC Task Force [R]. Princeton, NJ, USA; North American Electric Reliability Council, 1996.
- [7] 江伟, 王成山. 电力系统输电能力研究中 PV 曲线的求取. 电力系统自动化, 2001, 25(2): 9-12.
JIANG Wei, WANG Chengshan. PV curve tracing in power system transfer capability analysis. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(2): 9-12.
- [8] GREENE S, DOBSON I, ALVARADO F L. Sensitivity of the loading margin to voltage collapse with respect to arbitrary parameters. IEEE Trans on Power Systems, 1997, 12(1): 262-272.
- [9] PALSSON M P, TOFTVAAQ T, UHLEN K, et al. Large-scale wind power integration and voltage stability limits in regional networks// Proceedings of IEEE Power Engineering Society Summer Meeting; Vol 2, Jul 21-25, 2002, Chicago, IL, USA: 762-769.
- [10] PABLO L, JULIO U. Minimum voltage protections in variable speed wind farms// Proceedings of IEEE Porto Power Tech Conference; Vol 4, Sep 10-13, 2001, Porto, Portugal; 6.
- [11] 吴俊玲, 周双喜, 孙建锋, 等. 并网风力发电场的最大注入功率分析. 电网技术, 2004, 28(20): 28-32.
WU Junling, ZHOU Shuangxi, SUN Jianfeng, et al. Analysis on maximum power injection of wind farm connected to power system. Power Systems Technology, 2004, 28(20): 28-32.
- [12] FEIJOO A E, CIDRAS J. Modeling of wind farms in the load flow analysis. IEEE Trans on Power Systems, 2000, 15(1): 110-115.
- [13] FUERTE-ESQUIVEL C R, TOVAR-HERNANDEZ J H, GUTIERREZ-ALCARAZ G, et al. Discussion of "modeling of wind farms in the load flow analysis". IEEE Trans on Power Systems, 2001, 16(4): 951.
- [14] 吴义纯, 丁明, 张力军. 含风电场的电力系统潮流计算. 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. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(4): 36-39.
- [15] FEIJOO A E, CIDRAS J, DORNELAS J L G. Wind speed simulation in wind farms for steady-state security assessment of electrical power systems. IEEE Trans on Energy Conversion, 1999, 14(4): 1582-1588.
- [16] CHEN Z, SPOONER E. Grid power quality with variable speed wind turbines. IEEE Trans on Energy Conversion, 2001, 16(2): 148-154.
- [17] TAYLOR C W. Power system voltage stability. New York, NY, USA: McGraw Hill, 1994.
- [18] 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. 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. Power Systems Technology, 2002, 26(8): 8-11.

王成山(1962—),男,博士生导师,长江学者特聘教授,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。E-mail: cswang@tju.edu.cn

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。E-mail: sunwei_tju@eyou.com

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。E-mail: xgwang06@hotmail.com

(下转第 31 页 continued on page 31)

Total Transfer Capability Calculation of Power System Including Large-scale Wind Farm

WANG Chengshan, SUN Wei, WANG Xinggang

(Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: While wind power generation is developing rapidly all through the world, there are more and more megawatt grad wind farms being connected directly into the power system. In this paper, on the base of traditional RX model for wind power flow calculation, a new continuation power flow calculation model is established using the π -type equivalent circuit of asynchronous wind turbine. Based on the proposed model, total transfer capability (TTC) of power system containing large-scale wind farms is investigated under the constraint condition of static voltage stability. The calculation results show that the variations of wind speed have a great influence on TTC. Especially when the penetration power is increasing, the effect of wind speed on TTC of power system will become more notable.

This work is supported by the Key Grant Project of Chinese Ministry of Education (No. 306004).

Key words: large-scale wind farm; asynchronous generator; total transfer capability; continuation power flow