

计及尾流效应的双馈机组风电场等值建模研究

徐玉琴, 张林浩, 王娜

(华北电力大学电气与电子工程学院, 河北 保定 071003)

摘要: 针对双馈机组风电场内机组间尾流的相互影响, 提出一种新的风电场等值建模方法。该方法考虑尾流效应, 定义了“尾流影响因子”表征各台风电机组受其他风电机组尾流影响的程度, 并以此作为风电场内风电机组的分组依据。将风向作为输入, 从而进行风电机组的分组以及合并等值。同时给出了合并后等值模型参数的计算方法, 得到风电场的多机等值模型。仿真结果表明, 利用该方法建立的等值模型较之传统的等值模型能更准确地体现风电场的功率输出特性。

关键词: 尾流效应; 风电场; 尾流影响因子; 风电机组分组; 等值模型

Study on equivalent model of wind farms with DFIG considering wake effects

XU Yu-qin, ZHANG Lin-hao, WANG Na

(School of Electric and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

Abstract: As to the mutual effect of wake turbulence among wind turbines in a wind farm with wind turbine driven doubly fed induction generator (DFIG), a new equivalent modeling method is proposed. This method considers the wake effects of wind turbines and defines the wake effect factor which shows how one wind turbine is affected by the others. This method also uses this factor as a grouping rule of wind turbines. Using wind direction as input, the calculating method groups the wind turbines and aggregates the same group. The calculating method of equivalent model parameters is provided, thus a wind farm model which is represented by few wind turbines is obtained. Compared with the traditional equivalence model, the simulation results show that the equivalent model based on the proposed method describes the power output of wind farms more accurately.

Key words: wake effects; wind farm; wake effect factor; grouping of wind turbines; equivalent model

中图分类号: TM74 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)01-0070-07

0 引言

风电场的等值建模对于研究含风电电力系统的相关问题十分必要^[1-2]。大型风电场内往往有数十甚至上百台风电机组, 若对每一台风电机组进行详细建模, 会极大地增加电力系统模型的复杂度, 导致仿真时间过长^[3], 不仅难以满足电力系统运行计算的要求且没有必要。同时, 在研究风电场对电力系统的影响时, 并不需要考虑单台风力机组, 而是将风电场视为一个整体。有效的解决方法是对风电场进行聚合等值^[4]。

目前, 大型双馈机组风电场等值建模方法有以下四种: ①将整个风电场等值为单台风电机组, 其容量等于所有风电机组容量之和^[5]。②只考虑风电机组的功率-风速曲线, 计算等效风速作为风电场的输入^[6-7], 从而得到风电场的输出功率。③利用现代的动态等值方法如同调等值法、模式等值法^[8], 对

风电场受到干扰后具有相同或接近动态特性的机组分组, 同组的风电机组等效成一台风电机组, 从而得到用多台机表征的风电场等值模型。④利用风速对风电机组进行分组, 同组风电机组进行参数等值, 用多台机表征风电场^[9-10]。

由于大型风电场占地面积广、风电机组数量多, 场内风速分布并不均匀, 各风电机组处于不同的运行点, 因此方法1和方法2采用的单机等值法会带来较大误差; 方法3的分组依据是风电场遭受较大干扰或故障时风电机组的动态特性, 适用于暂态过程分析, 而在风电场稳态运行过程中, 对风电场输出特性起主导作用的因素则是风速和风向; 方法4建立的等值模型精度较高, 但大型风电场内风速变化差异大, 有可能导致分组过多, 仿真时间变长, 且机组间风速变化往往具有连续性, 导致分组指标不明显。

针对双馈机组风电场, 本文提出了一种新的等

值方法, 考虑风向及尾流效应的影响, 定义了“尾流影响因子(w_c)”作为风电机组的分组指标, 对同组风电机组进行参数等值, 得到风电场的多机等值模型。在电力系统分析综合程序(PSASP)中建立了相应详细模型及等值模型, 仿真结果证明了该方法的有效性。

1 考虑尾流影响的风电机组分组方法

1.1 尾流效应模型

大型风电场内有大量分散布置的风电机组^[11], 在某一风向作用下, 坐落于下风向的风电机组的风速往往低于坐落于上风向风电机组的风速, 这种现象称之为尾流效应。自然风经过每台风电机组后形成的尾流效应影响区域是一个圆锥形空间, 具有三维的特点, 在风电场等值分析中通常采用如图1所示的二维模型。

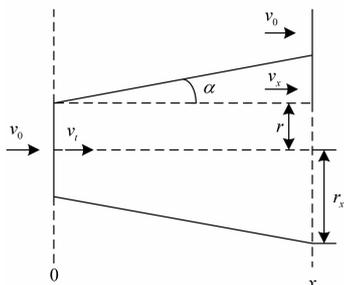


图1 尾流效应二维模型

Fig. 1 Two-dimensional model of the wake effects

图中, 风电机组安装在0处; x 为风经过风轮后沿风向传播的距离; v_0 和 v_1 分别为自然风速和通过叶片的风速; v_x 为受尾流影响的风速; r 为风轮半径; α 为圆锥顶点因数^[12]; r_x 为风轮在 x 处投影截面半径。

$$r_x = r + x \tan \alpha \quad (1)$$

式(1)中, $\tan \alpha$ 为尾流下降常数^[12], 它与风的湍流强度(一定时间内风速的均方差与均值之比)成正比, 表示风经过风轮后沿风向每传播1m时 r_x 所增加的长度, 一般可表示为 k 。

$$k = \tan \alpha = k_w (\sigma_G + \sigma_0) / U \quad (2)$$

式中: σ_G 和 σ_0 分别为风电机组产生的湍流和自然湍流的均方差; U 为平均风速; k_w 是一经验常数。

1.2 机组间的尾流影响

风电场中的每台风电机组都有可能受到上游风电机组尾流的影响, 同时其产生的尾流也会影响下游风电机组的输入风速。为了表示每台风电机组受其他风电机组尾流影响程度的高低, 本文定义了“尾流影响因子(w_c)”作为衡量指标。

任意一台风电机组的尾流影响因子初始值均为0, 每受到其上游一台风电机组的影响(即其风轮处于上游机组尾流影响区域内)时, 这台风电机组的尾流影响因子便加1。某台风电机组的 w_c 值越大, 表示它受到其他机组的尾流影响越大; 某台风电机组的 w_c 值越小, 表示它受到其他机组的尾流影响越小。为便于说明, 下面以图2来分析尾流影响因子的物理意义。

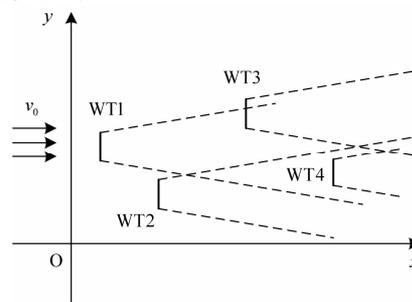


图2 风电机组间尾流影响

Fig. 2 Impact of wake turbulence among wind turbines

如图2所示, 4台风电机组分散布置, 风向与 x 轴平行, 在偏航系统的作用下, 风电机组的风轮面都垂直于风向。每台风电机组接受来风后, 都会在其下游方向产生一片尾流影响区域(如虚线所示), 尾流影响因子即可根据每台风电机组的风轮位于几个尾流影响区域来确定。以图2为例, WT1和WT2没有受到其他风电机组影响, 其 w_c 值为初始值0; WT3位于WT1所产生的尾流影响区域内, 其 w_c 值为1; WT4同时位于WT1和WT2产生的包络线内, 因此其 w_c 值为2。通过比较尾流影响因子可以看出, 4台风电机组受到尾流效应影响的程度由高到低为WT4、WT3、WT1和WT2。

设上游风电机组 WT_i 和下游风电机组 WT_j 的位置坐标分别为 (x_i, y_i) 及 (x_j, y_j) , 则它们之间的距离为

$$d_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} \quad (3)$$

当风向为 γ_1 时, WT_i 的风轮在 WT_j 处的投影截面半径为

$$r_{x1} = r + k \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} \quad (4)$$

风向变为 γ_2 时, WT_i 的风轮在 WT_j 处的投影截面半径为

$$r_{x2} = r + k \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} \cos \beta \quad (5)$$

其中, $\beta = \gamma_2 - \gamma_1$ 。

由式(4)、式(5)可知, 当风向变化时, 上游风电机组对下游风电机组的尾流影响会发生变化, 同时结合式(1)可知, 风向确定时, 上游机组对下游机组

的影响不会发生变化。

尾流下降常数 k 通常为一个较小的值, 由式(1)可知, 随着风的传播, r_x 的增量并不大, 因此当机组间距离较大时, 尾流效应带来的影响可能较小。但风电场内机组通常呈矩形排列, 当风向水平于某一行或某一列时, 前排机组所带来的尾流会影响到后排机组。当风向由 0 到 360° 变化的过程中, 必然存在机组间相互影响的情况, 因此考虑尾流影响是必要的。

1.3 风电机组分组方法

由以上分析可知, 每一个确定的风向都对应着一组确定的风电机组间的相互影响关系, 也就对应着一组确定的尾流影响因子。在给定风向、机组位置等条件下, 可以计算出各风电机组的尾流影响因子 w_c , 然后把其值相同的风电机组划归为一组, 计算流程如图 3 所示。

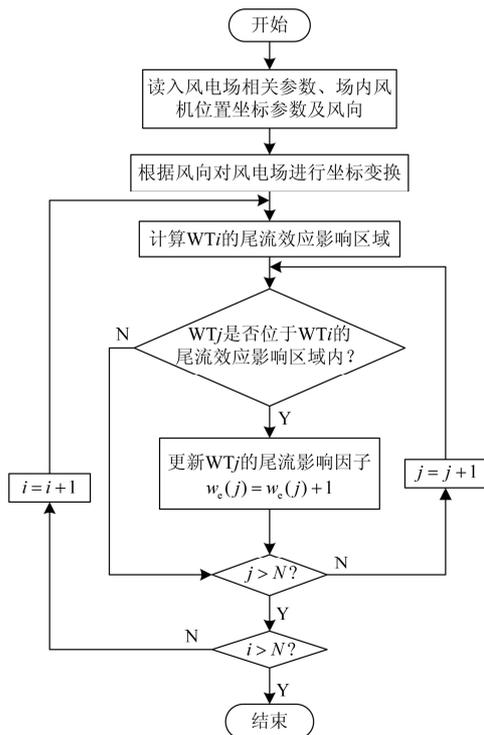


图 3 尾流影响因子计算框图

Fig. 3 Calculation diagram of the wake effect factor

在工程应用中, 可按照气象部门处理风向的习惯, 将 0 到 360° 的风向均匀分成 16 个风向区, 间隔为 22.5° 。每个风向区对应一种风电机组分组方式, 也就对应着一个多机表征的风电场等值模型。若已知风向随时间变化的序列, 则可以调用相应的等值模型来对风电场进行仿真建模分析。当然, 也可以根据实际情况取定步长划分风向区。

风电机组 WT_i 形成的尾流影响区域为

$$\begin{cases} x > x_i \\ y \geq -k(x - x_i) + y_i - r \\ y \leq k(x - x_i) + y_i + r \end{cases} \quad (6)$$

2 双馈机组风电场等值模型

2.1 等值风电机组参数计算

大型风电场可能由不同种类的风电机组构成, 双馈机组近年来成为风电场的主流机型, 本文只针对由双馈机组构成的风电场进行等值建模研究。

设风电场由 N 台型号相同的双馈风电机组组成, 利用尾流影响因子划分风电机组的方法将场内机组分为 M 组, 每个分组等效为一台风电机组, 得到风电场等值模型如图 4 所示。

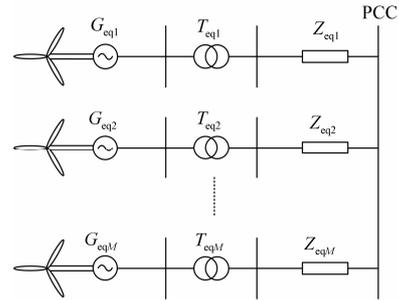


图 4 风电场等值模型

Fig. 4 Wind farm equivalent model

等值机的容量和有功分别为

$$\begin{cases} S_{eq} = mS \\ P_{G_{eq}} = mP_G \end{cases} \quad (7)$$

式中: 下标 eq 表示等值后参数; m 为等值前同组风电机组台数; S 和 P_G 分别为组内单台风电机组的容量及有功。

等效风电机组各部分参数的计算方法如下。

(1) 发电机参数

$$\begin{cases} x_{s_{eq}} = \frac{x_s}{m}; x_{r_{eq}} = \frac{x_r}{m}; x_{m_{eq}} = \frac{x_m}{m} \\ r_{s_{eq}} = \frac{r_s}{m}; r_{r_{eq}} = \frac{r_r}{m} \end{cases} \quad (8)$$

式中: x_s 和 x_r 分别为发电机定子电抗及转子电抗; x_m 为发电机励磁电抗; r_s 和 r_r 分别为发电机定子电阻和转子电阻。

(2) 轴系参数

$$\begin{cases} T_{g_{eq}} = mT_g; T_{L_{eq}} = mT_L \\ K_{s_{eq}} = mK_s; D_{s_{eq}} = mD_s \end{cases} \quad (9)$$

式中: T_g 和 T_L 分别为发电机和风力机的转子惯性时间常数; K_s 为轴系刚度系数; D_s 为阻尼系数。

(3) 控制参数

除了功率控制模块, 其他控制模块的参数保持不变。功率控制模块的等效基准容量为

$$S_{\text{ref_eq}} = mS \quad (10)$$

无功功率控制参考值为

$$Q_{\text{ref_eq}} = \sum_{i=1}^m Q_{\text{ref_}i} \quad (11)$$

2.2 等值风速计算

如图 1 所示的尾流效应模型, 考虑到 0 处风电机组的尾流影响, x 处风电机组接收到的风速为

$$v_x = v_0 \left[1 - \left(\frac{r}{kx+r} \right)^2 (1 - \sqrt{1 - C_T}) \right] \quad (12)$$

式中, C_T 为推力系数。

计算任意一台风电机组的输入风速时, 必须考虑其他机组对其造成的影响。根据动量守恒定律可得到任意一台风电机组接收到的风速。

$$v_i = \sqrt{v_{i0}^2 + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n \frac{A_{j-i}}{A_i} (v_{j-i}^2 - v_{i0}^2)} \quad (13)$$

其中: v_i 为风电机组接收到的风速; v_{i0} 为不考虑尾流效应时作用在第 i 台风电机组上的风速; v_{j-i} 为考虑尾流影响时第 j 台风电机组作用在第 i 台风电机组上的风速; A_{j-i} 为风电机组 i 处第 j 台风电机组的投影面积; A_i 为第 i 台风电机组的风轮面积; n 为风电机组总台数。

利用式(12)、式(13)可计算出各台风电机组的输入风速, 等效风电机组的输入风速可取本组风电机组输入风速的平均值为

$$v_{\text{eq}} = \frac{\sum_{k=1}^m v_k}{m} \quad (14)$$

2.3 集电系统等值计算

(1) 变压器参数

$$\begin{cases} S_{\text{T_eq}} = mS_{\text{T}} \\ x_{\text{T_eq}} = \frac{x_{\text{T}}}{m} \end{cases} \quad (15)$$

式中: S_{T} 为变压器容量; x_{T} 为变压器电抗。

(2) 电缆参数

风电场有干线式及放射式两种结构^[13-14], 为便于说明, 下面给出干线式结构的等值电缆推导过程。对两种结构的电缆等值时所遵循的原则为: 等效风电机组接入点电压等于等效前同组风电机组接入点电压的加权平均值, 并以风电机组的输出功率为权重。

如图 5 所示的干线式接线结构, 共有 n 台风电

机组, 假定图 4 中的等值风电机组 1 由等值前的 1 至 m 号风电机组合并而来。

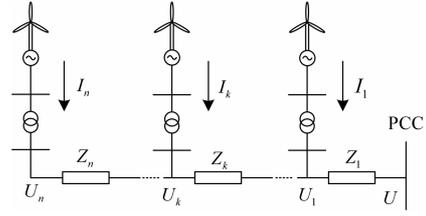


图 5 干线式接线图

Fig. 5 Structural diagram connected in series

U_k 与公共连接点 PCC 之间的电压差为

$$\Delta U_k = \frac{\sum_{i=1}^k \left(Z_i \sum_{j=1}^n P_j \right)}{\sqrt{3}U} \quad (16)$$

式中: Z_i 为第 i 条电缆的阻抗; P_j 为第 j 台风电机组的输出功率; U 为 PCC 的电压。

等值前 1~ m 号风电机组的加权平均电压差为

$$\Delta \bar{U} = \frac{\sum_{i=1}^m (\Delta U_i P_i)}{\sum_{i=1}^m P_i} \quad (17)$$

等值风电机组 1 与 PCC 之间的电压差为

$$\Delta U_{\text{eq1}} = \frac{Z_{\text{eq1}} \sum_{i=1}^m P_i}{\sqrt{3}U} \quad (18)$$

由等值前后 $\Delta \bar{U}$ 与 ΔU_{eq1} 相等可得

$$Z_{\text{eq1}} = \frac{\sum_{i=1}^m \left(\sum_{k=1}^i \left(Z_k \sum_{j=k}^n P_j \right) P_i \right)}{\left(\sum_{i=1}^m P_i \right)^2} \quad (19)$$

同理, 对于放射式结构

$$Z_{\text{eq1}} = \frac{\sum_{i=1}^m Z_i P_i^2}{\left(\sum_{i=1}^m P_i \right)^2} \quad (20)$$

对于风电场通常呈现的 M 行 L 列的网络结构, 对某组风电机组进行等值时, 可根据上述方法依次分解为干线式和放射式接线结构来计算, 由电缆的等值原则可知, 等值后的机组在同一条连接线上。

2.4 等值模型的误差分析

为比较不同等值方法的准确性, 定义有功功率平均误差 E_p 和无功功率平均误差 E_Q 作为评价指标, 计算式如式(21)、式(22)。

$$E_p = \frac{\sum_{n=1}^N |P_{in} - P_n|}{\sum_{n=1}^N |P_n|} \quad (21)$$

$$E_Q = \frac{\sum_{n=1}^N |Q_{in} - Q_n|}{\sum_{n=1}^N |Q_n|} \quad (22)$$

式中： P_{in} 和 Q_{in} 分别代表基于等值方法 i 的等效风电场出口处的有功和无功； P_n 和 Q_n 分别代表基于详细模型的风电场出口处的有功和无功； n 表示对每一步仿真步长进行积分计算的序列号。

3 算例分析

3.1 算例 1

在电力系统分析综合程序(PSASP)中建立了某双馈机组风电场仿真模型，模型结构如图 6 所示。

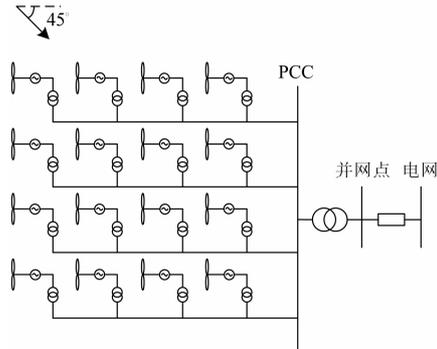


图 6 风电场系统结构图

Fig. 6 Block diagram of wind farm electric power system

风电场由 4 行×4 列共 16 台 GE1.5 MW 双馈风电机组组成，风电机组的编号为第一排从左至右：WT1 至 WT4，以此类推，第四排为 WT13 至 WT16；风电机组通过机端变压器(35 kV/690 V)及电缆连接在公共连接点 PCC 上，再经过风电场升压变压器(110 kV/35 kV)及双回线路接入电网。风电场中每排相邻 2 台风电机组的距离以及每排风电机组间的距离均为 500 m，风机间电缆长度也为 500 m。尾流下降常数 k 取 0.063。风速模型为基本风 10 m/s，5~25 s 加入随机噪声风，为不失一般性，取风向为 45°，如图 5 所示。

根据本文所提方法，利用尾流影响因子对风电机组进行分组，结果如表 1 所示。

根据表 1 所示分组结果可得风电场的 4 机等值模型，通过计算可得各等值机的等值风速分别为 $v_1 = v_0$ ， $v_2 = 0.9561v_0$ ， $v_3 = 0.9141v_0$ ， $v_4 = 0.8740v_0$ ，其中 v_0 为风电场来风风速；等值电缆阻抗为

$Z_1 = 2.0714Z$ ， $Z_2 = 1.6Z$ ， $Z_3 = 1.1667Z$ ， $Z_4 = Z$ ，其中 Z 为每段电缆的阻抗。

表 1 基于 w_e 的风电机组分组结果

Table 1 Wind turbines' grouping results based on w_e

分组号	机组号	尾流影响因子
1	1,2,3,4,5,9,13	0
2	6,7,8,10,14	1
3	11,12,15	2
4	16	3

图 7 为在模拟风速下对风电场详细模型、4 机等值模型以及单机等值模型进行仿真后的风电场出口处有功功率曲线和无功功率曲线。

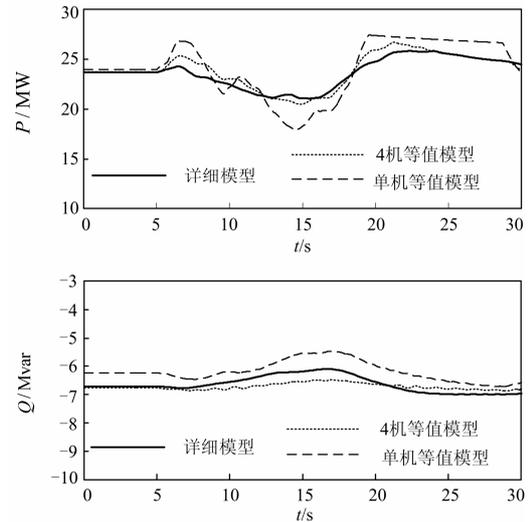


图 7 风电场并网有功、无功曲线

Fig. 7 Active and reactive power curve of wind farm at point of interconnection

以详细模型作为基准，对单机等值模型及 4 机等值模型进行误差分析，结果如表 2 所示。

由表 2 可知，与单机等值模型相比，利用本文方法建立的 4 机等值模型产生的误差较小，能相对更准确地反映出风电场的实际运行情况。

表 2 两种等值方法的误差

Table 2 Error of two equivalence methods

等值方法	$E_p / \%$	$E_Q / \%$
单机模型	5.08	8.95
4 机模型	1.65	2.69

3.2 算例 2

为检验等值方法在大型风电场中的有效性，在 PSASP 中建立了 6 行×8 列共 48 台 GE1.5 MW 双馈机组构成的风电场。风电机组的编号方式、机端

变压器与升压变压器型号、机组间距、尾流下降常数以及风速模型均和算例 1 相同, 风向取 45° 。

利用尾流影响因子对风电机组进行分组, 结果如表 3 所示。

表 3 基于 w_c 的风电机组分组结果

分组号	机组号	尾流影响因子
1	1,2,3,4,5,6,7,8,9,17,25,33,41	0
2	10,11,12,13,14,15,16,18,26,42	1
3	19,20,21,22,23,24,34,43	2
4	27,28,29,30,31,32,35	3
5	36,37,38,39,40,44	4
6	45,46,47,48	5

可以看出, 风电机组增加 3 倍以后, 分组数只增加了 2 组, 这是因为使用尾流影响因子能够使分组指标更为明显, 克服了利用风速作为分组指标时步长小导致分组过多的问题, 使计算得到简化, 是本文方法的优点之一。

对风电场详细模型、6 机等值模型以及单机等值模型进行仿真, 结果如图 8 所示。

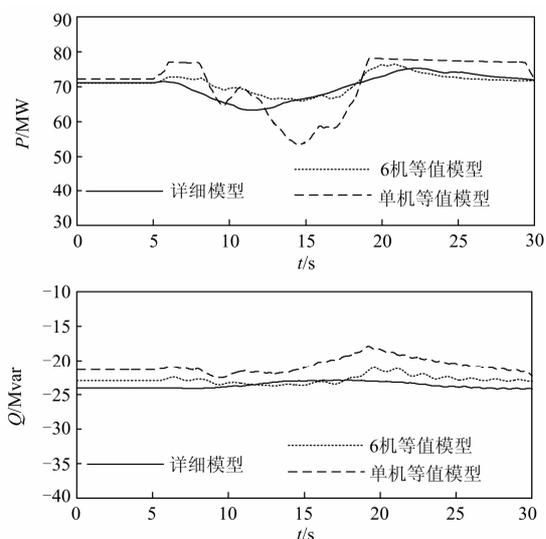


图 8 大型风电场并网点有功、无功曲线

Fig. 8 Active and reactive power curve of large-scale wind farm at point of interconnection

同样以详细模型作为基准, 对单机等值模型及 6 机等值模型进行误差分析, 结果如表 4 所示。

表 4 得出了与表 2 相同的结论, 即利用本文方法建立的等值模型产生的误差较小, 相比于传统的单机等值模型, 能更准确地反映出风电场的功率输出特性, 也说明了本方法同样适用于大型风电场的

等值建模。

表 4 两种等值方法的误差

等值方法	$E_p / \%$	$E_Q / \%$
单机模型	6.25	12.07
6 机模型	2.24	4.06

4 结论

本文提出了一种计及尾流效应的双馈机组风电场多机等值方法。该方法考虑了风电机组之间的相互影响, 定义了“尾流影响因子(w_c)”作为风电机组的分组依据, 对同组风机进行合并等值。同时, 给出了等值风电机组参数以及等值集电系统参数的计算方法。

仿真结果表明, 利用该方法对风电机组进行分组, 程序简便易实现, 计算速度快, 与传统的单机等值模型相比, 得到的多机等值模型能更准确地反映风电场并网点的有功功率和无功功率特性, 适用于大型双馈机组风电场的动态等值建模以及含大型风电场电力系统的稳态分析, 具有重要的工程应用价值。

参考文献

- [1] 李辉, 王荷生, 史旭阳, 等. 基于遗传算法的风电场等值模型的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(11): 1-8, 16.
- LI Hui, WANG He-sheng, SHI Xu-yang, et al. Study on equivalent model of wind farms based on genetic algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(11): 1-8, 16.
- [2] 乔嘉赓, 鲁宗相, 闵勇, 等. 风电场并网的新型实用等效方法[J]. 电工技术学报, 2009, 24(4): 209-213.
- QIAO Jia-geng, LU Zong-xiang, MIN Yong, et al. New dynamic equivalence method for grid-connected wind farm[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(4): 209-213.
- [3] 付蓉, 谢俊, 王保云. 风速波动下双馈机组风电场动态等值[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(15): 1-6.
- FU Rong, XIE Jun, WANG Bao-yun. Study on dynamic equivalence model of wind farms with DFIG under wind turbulence[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(15): 1-6.
- [4] 金宇清, 黄桦, 鞠平, 等. 用于风电场聚合建模的内部集电网络变换方法[J]. 电力系统保护与控制, 2012,

- 40(16): 34-41.
JIN Yu-qing, HUANG Hua, JU Ping, et al. Collector network transformation methods for wind farm aggregated modeling[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(16): 34-41.
- [5] Gerardo G, Tapia A, Ostolaza J X. Two alternative modeling approaches for the evaluation of wind farm active and reactive power performances[J]. IEEE Trans on Energy Conversion, 2006, 21(4): 909-1000.
- [6] 严干贵, 李鸿博, 穆钢, 等. 基于等效风速的风电场等值建模[J]. 东北电力大学学报, 2011, 31(3): 13-19.
YAN Gan-gui, LI Hong-bo, MU Gang, et al. Equivalent model of wind farm by using the equivalent wind speed[J]. Journal of Northeast Dianli University, 2011, 31(3): 13-19.
- [7] Fernandez L M, Garcia C A, saenz J R. Equivalent models of wind farms by using aggregated wind turbines and equivalent wind[J]. Energy Conversion and Management, 2009(50): 691-704.
- [8] 倪以信, 陈寿孙, 张宝霖. 动态电力系统的理论和分
析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002.
- [9] 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.
- [10] 曹娜, 于群. 风速波动情况下并网风电场内风电机组分组方法[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(2): 42-46.
CAO Na, YU Qun. A grouping method for wind turbines in a grid-connected wind farm during wind speed fluctuation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(2): 42-46.
- [11] 曾程, 叶林, 赵永宁. 考虑尾流效应的风电场短期功率空间预测模型[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(24): 59-64, 142.
ZENG Cheng, YE Lin, ZHAO Yong-ning. Spatial model for short term wind power prediction considering wake effects[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(24): 59-64, 142.
- [12] WASP. The wind atlas analysis and application program[EB/OL]. [2010-08-10]. <http://www.wasp.dk/Download/Power-Curves.html>.
- [13] 米增强, 苏勋文, 杨奇逊, 等. 风电场动态等值模型的多机表征方法[J]. 电工技术学报, 2010, 25(5): 162-169.
MI Zeng-qiang, SU Xun-wen, YANG Qi-xun, et al. Multi-machine representation method for dynamic equivalent model of wind farms[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(5): 162-169.
- [14] 米增强, 苏勋文, 余洋, 等. 双馈机组风电场动态等效模型研究[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(17): 72-77.
MI Zeng-qiang, SU Xun-wen, YU Yang, et al. Study on dynamic equivalence model of wind farms with wind turbine driven doubly fed induction generator[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(17): 72-77.

收稿日期: 2013-04-23; 修回日期: 2013-06-12

作者简介:

徐玉琴(1964-), 女, 硕士, 教授, 主要研究方向为电力系统分析、运行与控制, 分布式发电与配电网, 电力系统继电保护等;

张林浩(1988-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统分析、运行与控制; E-mail: zlh_ncepu@163.com

王娜(1988-), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统分析、运行与控制。