

DOI: 10.7667/PSPC160431

# 基于两步分群法的双馈机组风电场等值建模

徐玉琴, 刘丹丹

(华北电力大学电气与电子工程学院, 河北 保定 071003)

**摘要:** 为了在保证风机等值精度的基础上降低风电场仿真模型的复杂度, 考虑到实际风电场内尾流效应及风机控制方式不同的情况, 借鉴层次分析法的思想提出了两步分群法。该方法综合考虑了风机初始运行点以及动态特性。首先考虑风电机组间尾流效应计算输入风速, 根据机组桨距角动作情况进行初次分群, 通过转子电流受扰曲线识别动态特性相近的风机实现再次分群。然后在保证风电机组功率输出特性和电压差恒定的基础上, 进行风机和集电线路参数等值, 得到风电场多机等值模型。最后通过仿真验证了所述方法的合理性。

**关键词:** 双馈风电机组; 风电场; 两步分群; 输入风速; 动态特性

## Equivalence of wind farms with DFIG based on two-step clustering method

XU Yuqin, LIU Dandan

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

**Abstract:** In order to reduce complexity of simulation model of wind farm while ensuring accuracy, and considering wake effect and different control methods in actual wind farm, a two-step clustering method based on Analytic Hierarchy Process is proposed. Both initial operating point and dynamic behavior are considered in this method. Firstly, the input wind speed is calculated under the influence of wake effect. The first step clusters the DFIGs according to pitch angle action situation, and the second step re-clusters the DFIGs by their dynamic characteristics according to disturbed curves of rotor current. Then parameters of equivalent wind turbine generators and collecting power lines are derived respectively to ensure power output characteristics and voltage difference constant. Thus a multi-machine equivalent model of wind farm is obtained. Finally the proposed equivalent method is validated by simulation results.

**Key words:** doubly fed induction generator; wind farm; two-step clustering method; input wind speed; dynamic characteristics

## 0 引言

风电并网改变了系统潮流分布进而影响系统稳定, 在风电场规划阶段对其并网造成的影响进行仿真分析尤为重要。风电场往往由上百台风机组成, 在分析过程中没有必要对每台机组详细建模<sup>[1-2]</sup>, 通常将风电场视为一个整体。为准确分析风电并网对电力系统稳定运行的影响, 需提高风电场等值精度。

风电场等值常用方法有: 单机等值、半机等值及多机等值<sup>[3-5]</sup>。传统的单机等值对于大型风电场来说误差较大。半机等值只针对内部模块可调节的风机模型, 且对仿真软件不具有普适性。因此, 多机等值更适合我国实际情况, 分群是风电场多机等值的重要内容。风电场内风机分散分布, 风机所受风速不同, 多数研究以风速作为分群依据。文献[6-8]

提出以风速和风向作为划分风电机群的依据; 文献[9]将尾流影响因子作为分群指标; 文献[10]以双馈风电机组(Doubly Fed Induction Generator, DFIG)桨距角是否动作为分类指标, 实质上考虑了风速对机组运行状态的影响。上述方法的前提是假设风机型号及控制方式相同, 双馈风机可以实现恒电压和恒功率因数两种控制方式, 各有利弊, 控制方式不同则风机呈现的动态特性也不同<sup>[11]</sup>。实际风电场运行调度综合考虑了两种控制方式的优劣, 每台风机的状态时刻改变<sup>[12]</sup>。还有部分研究以风电机组动态特性为分群依据, 文献[13]利用特征分析法提取风机运行过程的主导变量作为分群指标, 但特征根无法反映扰动地点、类型等对风机运行特性的影响。文献[14-15]采用基于风电场并网点暂态电压受扰曲线的分群方法, 结果表明受扰曲线能够反映系统运行

方式及故障类型。

为保持等值前后风机动态特性一致, 本文考虑了同一风电场内不同控制方式, 借鉴层次分析法的思想采用两步分群法。首先分别以输入风速和转子电流受扰曲线为依据对风电场分群; 然后根据等值前后风电机组功率输出特性和电压差恒定, 实现风电机组和集电线路参数的等值; 最后通过 Matlab 仿真检验模型的准确性。

## 1 风电机组分组依据

### 1.1 风机动态特性判别观测量

目前我国大型风电场多采用异步风力发电机, 向系统输送有功功率的同时吸收无功功率, 通常简化为 PQ 节点。因此, 风机动态特性主要体现在其功率输出特性。但发电机出口的功率为非状态量, 无法实现动态特性的精确判别。

同步旋转坐标系下, 双馈机组定转子磁链、电压及定子功率模型如式(1)~式(3)。

$$\begin{cases} \psi_s = L_s I_s + L_m I_r \\ \psi_r = L_r I_r + L_m I_s \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} U_s = R_s I_s + \frac{d\psi_s}{dt} + j\omega_e \psi_s \\ U_r = R_r I_r + \frac{d\psi_r}{dt} + j\omega_{sl} \psi_r \end{cases} \quad (2)$$

$$P_s + jQ_s = -\frac{3}{2} U_s \hat{I}_s \quad (3)$$

式中:  $\psi_s, \psi_r$  分别为定转子磁链;  $L_s, L_r$  分别为定转子绕组自感;  $L_m$  为定转子绕组间等效互感;  $I_s, I_r$  分别为定转子电流;  $U_s, U_r$  分别为定转子电压;  $R_s, R_r$  分别为定转子电阻;  $\omega_e$  为同步转速;  $\omega_{sl}$  为滑差角速度;  $P_s, Q_s$  分别为定子有功、无功功率。

采用定子磁链定向时, 定子磁链  $\psi_s$  与同步旋转坐标系  $d$  轴重合, 定子磁链  $dq$  轴分量如式(4)所示。

$$\begin{cases} \psi_{sd} = |\psi_s| = \psi_s \\ \psi_{sq} = 0 \end{cases} \quad (4)$$

将式(1)、式(2)、式(4)代入式(3), 得

$$\begin{cases} P_s = \frac{3\omega_e L_m}{2L_s} \psi_s i_{dr} \\ Q_s = -\frac{3\omega_e}{2L_s} \psi_s (\psi_s - L_m i_{dr}) \end{cases} \quad (5)$$

由式(5)可知, 在定子磁链定向控制下, 双馈风机的定子输出有功功率和无功率可通过调节  $i_{dr}$

和  $i_{qr}$  实现独立调节。此外, 文献[16]研究表明风电机组出口功率受扰轨线与转子侧控制器的中间状态量强相关, 因此通常选取  $i_{dr}$  和  $i_{qr}$  作为风机动态特性判别观测量。

### 1.2 考虑尾流影响确定输入风速

风电场内大量风机分散分布, 上风向机组吸收部分风能形成尾流区域, 对下风向机组有一定遮挡作用, 且影响程度与风机间距离成反比。

相距  $x$  的两台风机, 下风向机组输入风速为

$$v_i = v_0 \left[ 1 - \left( \frac{r_i}{kx + r_i} \right)^2 \left( 1 - \sqrt{1 - C_T} \right) \right] \quad (6)$$

式中:  $v_0$  是初始风速;  $k = \tan \alpha$  为尾流衰减常数;  $r_i$  为风轮半径;  $C_T$  为推力系数。

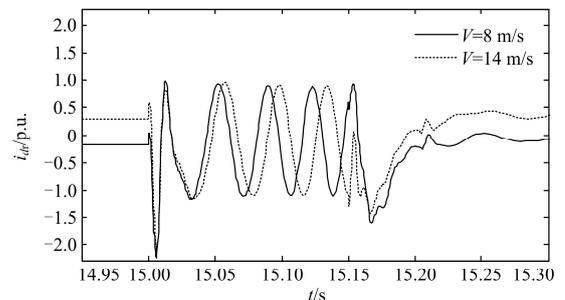
由于风电场内多台风机分散分布, 任意一台风机均有可能受到其他风机不同程度的影响。因此, 根据动量守恒定律可知作用在风机的输入风速为

$$v_i = \sqrt{v_{i0}^2 + \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^n A_{i,k} (v_{i-k}^2 - v_{i0}^2)} \quad (7)$$

式中:  $v_{i0}$  为忽略尾流影响时第  $i$  台机组输入风速;  $v_{i-k}$  为考虑第  $k$  台机组尾流影响时第  $i$  台机组输入风速;  $A_{i,k}$  为遮挡系数 ( $A_{i,k} = A_{s-ik} / A_{r-i}$ ,  $A_{s-ik}$  为第  $k$  台风机尾流面积,  $A_{r-i}$  为第  $i$  台风机扫风面积)。

当风向由  $\gamma_1$  变为  $\gamma_2$  时, 风机偏航装置将风轮调至迎风位置, 因此风机尾流影响区域也发生变化<sup>[6]</sup>。

风电机组转速低于额定转速时, 桨距角为  $0^\circ$ , 实现最大功率追踪; 随着风速增大, 桨距角动作控制转速、功率不超过额定范围<sup>[17]</sup>。因此, 机组桨距角动作情况影响风机运行点。为观察输入风速对风机运行特性的影响, 在 Matlab 中搭建双馈风机模型, 输入风速分别设为  $8 \text{ m/s}$  ( $\beta=0$ ) 及  $14 \text{ m/s}$  ( $\beta \neq 0$ ),  $15 \text{ s}$  时风机出口发生三相短路故障, 持续  $0.15 \text{ s}$ 。桨距角动作情况对  $i_{dr}$  和  $i_{qr}$  波动曲线的影响如图 1 所示。



(a) 转子电流  $d$  轴分量

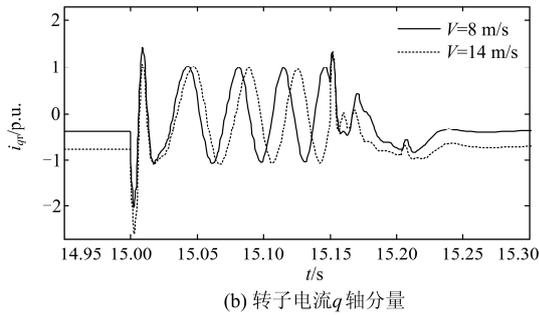


图 1 不同风速下的转子电流受扰曲线

Fig. 1 Disturbed curves of rotor current under different initial wind speed

由图 1 可以看出，改变输入风速，转子电流曲线波动趋势基本一致，风机初始运行点对风电机组受扰曲线有影响，但影响不显著。

### 1.3 风机控制方式

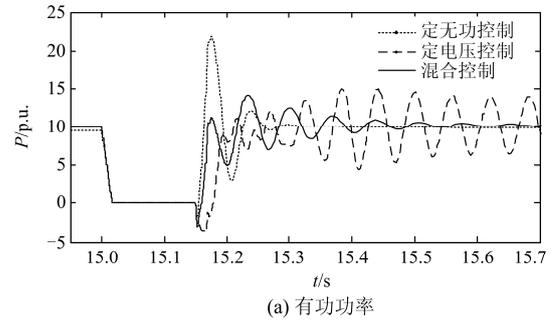
双馈风机通常采取恒电压控制或恒功率因数控制。定无功功率控制是恒功率因数的一种特殊情况，风机采用单位功率因数运行仅发出有功功率，不参与系统无功功率调节；恒电压控制下，机组可以根据系统电压变化调节风机无功出力，从而控制机端电压。

恒电压控制能够实现机组的无功调控功能，恒功率因数控制下机组具有良好的动态特性。在 Matlab 中搭建含 16 台机组的风电场并入无穷大系统，并网点设置三相故障持续 0.15 s，风机分别采用定电压控制、定无功功率控制及 1:1 混合控制进行仿真分析，波形如图 2 所示。由图 2(a)可以看出，系统故障切除后，定电压控制下风电场并网点有功功率波动较大，恢复稳定过程缓慢，系统动态性能和故障穿越能力降低；采用定无功功率控制时并网点有功功率虽然具有更好的动态性能，但故障切除后有功恢复值偏大。图 2(b)表明，定电压控制下风电场发出更多无功功率，导致风电场功率损耗增大，由于并网母线电压等级较低，产生的损耗不可忽略。混合控制综合了两种控制方式的优劣，保证了风机良好的动态特性，并提高了无功调控能力。因此，实际中应该结合风电场和系统的情况，实时调节风机控制方式。

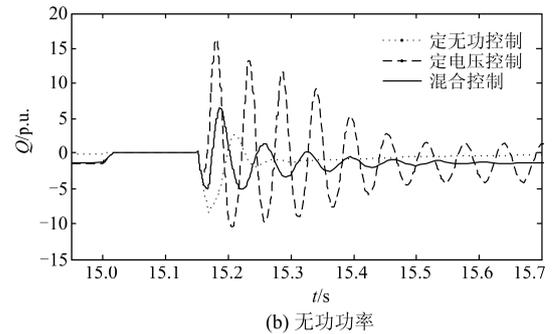
为进一步分析风机控制方式对运行特性的影响，在 1.2 节所述双馈风机模型的基础上，输入风速设为 8 m/s，风机出口设置三相短路，转子电流波动曲线如图 3 所示。

由图 3 可以看出，由于风机无功调节性能不同，风机采用不同控制方式对转子电流受扰曲线影响较大。因此，以  $i_{dr}$  和  $i_{qr}$  作为观测量能够区分风机不同

运行特性，进而实现风电机组分群。



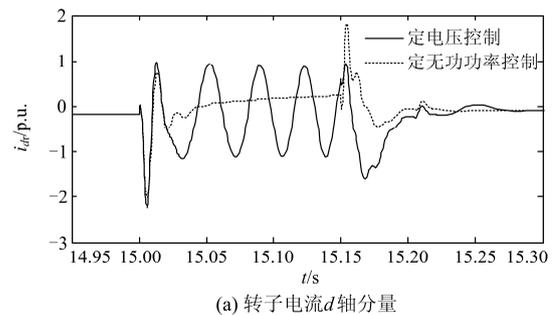
(a) 有功功率



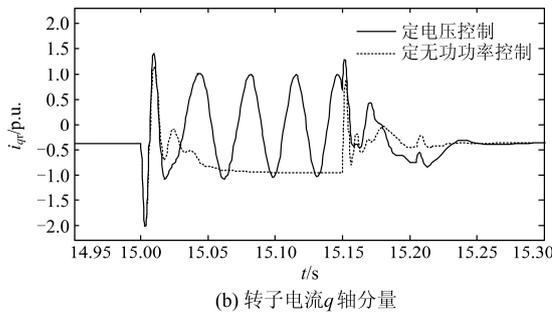
(b) 无功功率

图 2 不同控制方式下 PCC 处受扰曲线

Fig. 2 Disturbed curves in PCC under different control methods



(a) 转子电流d轴分量



(b) 转子电流q轴分量

图 3 不同控制方式下的转子电流受扰曲线

Fig. 3 Disturbed curves of rotor current under different control methods

## 2 风电机组分群

### 2.1 风电机组分群方法

为精确估算等值风机输入风速，更准确地反映

风机运行特性, 本文借鉴层次分析法的思想以风机等值为目标, 首先考虑机组间尾流效应获得输入风速, 以桨距角动作情况为评价准则将风电机组分为两类; 然后进一步以转子电流受扰曲线为第二层评价准则区分机组不同控制方式。

## 2.2 风电场等效模型

采用两步分群法将风电场内  $N$  台同容量、同型号的风机分为 4 个风电机群, 每个机群采用单机等值, 等值机组参数以下标 eq 表示。风电场等值模型如图 4 所示。

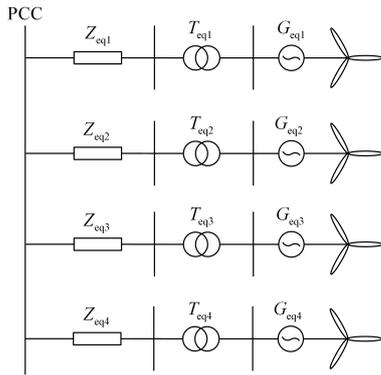


图 4 风电场等值模型

Fig. 4 Wind farm equivalent model

### 1) 风机参数等值

假设风机容量和型号相同, 因此等值风机参数与机群内风机台数  $m$  有关, 计算方法参考文献[9]。

### 2) 变压器参数等值

$$\begin{cases} S_{T\_eq} = mS_T \\ x_{T\_eq} = \frac{x_T}{m} \end{cases} \quad (8)$$

式中:  $S_T$  为变压器容量;  $x_T$  为变压器电抗。

### 3) 集电线路等值

风电场内接线通常采用干线式或放射式, 以等值风机并网点电压与原风电场同群风机并网点电压加权平均值相等为准则, 并以各风机有功出力为权重。集电线路等值阻抗可由式(9)、式(10)求得, 其中式(9)为干线式, 式(10)为放射式。

$$Z_{eq} = \frac{\sum_{i=1}^m \left( \sum_{k=1}^i \left( Z_k \sum_{j=k}^n P_j \right) P_i \right)}{\left( \sum_{i=1}^m P_i \right)^2} \quad (9)$$

$$Z_{eq} = \frac{\sum_{i=1}^m Z_i P_i^2}{\left( \sum_{i=1}^m P_i \right)^2} \quad (10)$$

式中:  $Z_k$  为第  $k$  条电缆的阻抗;  $P_i$  为第  $i$  台风电机的输出功率;  $n$  表示干线式连接的机组数。

### 4) 输入风速等值

风速等效需要保证等值前后风电机组输出功率一致, 对于桨距角已动作的风机, 其输出恒定功率, 因此该类等值风机的等效风速为

$$v_{eq1} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m v_i \quad (11)$$

桨距角未动作的风电机群根据风速波动进行最大功率追踪, 因此首先由输入风速求得各风机输出功率, 然后由平均功率反推出等效风速, 如式(12)所示。

$$\begin{cases} P_k = f(v_k) \\ v_{eq2} = f^{-1} \left( \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m P_k \right) \end{cases} \quad (12)$$

式中,  $f(\cdot)$  为风功率曲线拟合函数。

## 3 算例仿真

### 3.1 合理性分析

为验证本文所提等值方法的合理性, 在 Matlab 中搭建如图 5 所示的风电并网系统图。风电场由 16 台 1.5 MW 双馈风机组成, 风机通过 25 kV/575 V 升压变压器接入公共连接点(PCC), 再经过一台升压变压器与无穷大系统相连。任意相邻机组间距为 500 m, 风机叶片半径为 35 m, 设机组 WT1—WT4, WT9—WT12 为定电压控制, 其余 8 台机组为定无功功率控制。风速为 14 m/s, 风向为 45°, 推力系数  $C_T$  取 0.8, 尾流衰减常数  $k$  取 0.075。

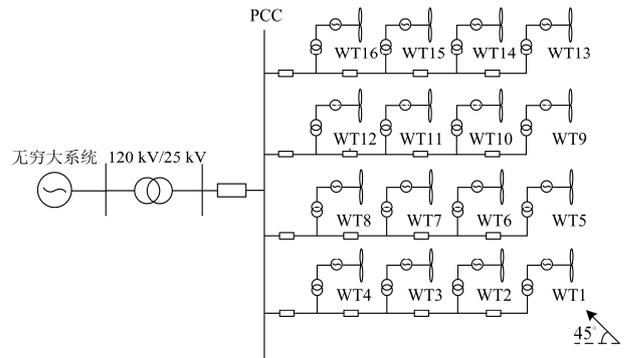


图 5 风电场系统接线图

Fig. 5 Connection diagram of wind power system

首先综合考虑风速、风向、风机位置及尾流影响估算风机输入风速, 进而判断机组桨距角是否动作, 并以此为依据进行初次分群。由本文所述方法估算风机输入风速如表 1 所示。根据风机输入风速可判断 WT1—WT5, WT9, WT13 桨距角动作可划

分为第一机群，其余机组桨距角未动作划分为第二机群。

表 1 输入风速估算结果

Table 1 Estimated results of input wind speed

风机编号	风速/(m/s)
1,2,3,4,5,9,13	14
6,7,8,10,14	12.7767
11,12,15	11.6603
16	10.6414

然后通过  $i_{dr}$  和  $i_{qr}$  的受扰曲线进行第二步分群。

公共连接点(PCC)在 15 s 时发生三相接地故障，持续 0.15 s 后故障消失，各机组转子电流  $dq$  轴分量受扰曲线如图 6 所示。

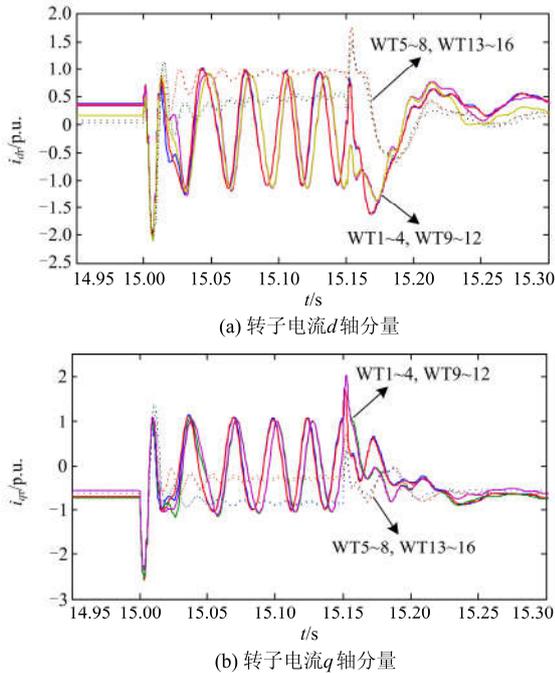


图 6 转子电流受扰曲线

Fig. 6 Disturbed curves of rotor current

图 6 表明：风机 WT1—WT4，WT9—WT12 的受扰曲线波动趋势基本一致，其余机组的波动趋势也基本一致，但两组差异较大，因此可将 16 台机组划分为两个机群。结合两次分群结果，最终将风电场划分为 4 个机群，划分结果、等效输入风速及集电线路等值参数如表 2 所示，Z 为等值前集电线路阻抗。

表 2 风机分群及等值结果

Table 2 Wind farms' clustering and equivalent results

分群序号	风机编号	输入风速/(m/s)	集电线路参数
1	WT1—WT4, WT9	14	1.240Z
2	WT5, WT13	14	0.5Z
3	WT6—WT8, WT14—WT16	12.351	0.824Z
4	WT10—WT12	12.055	1.652Z

根据等值结果对 4 机等值模型及详细模型分别进行仿真分析，得到风电场出口功率受扰曲线如图 7 所示。

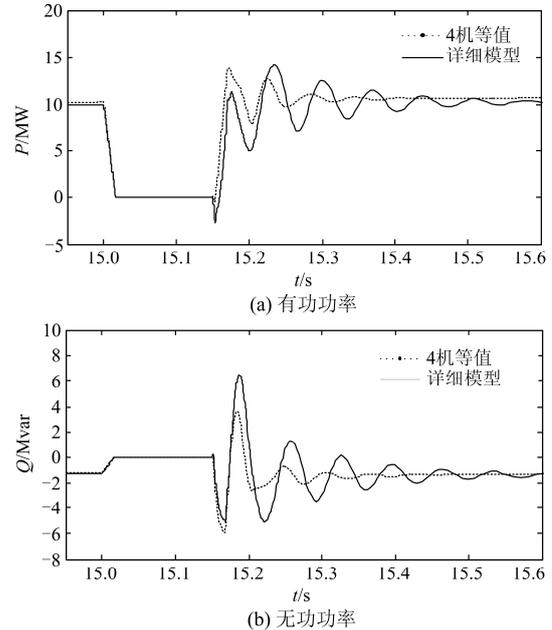


图 7 不同模型下 PCC 处受扰曲线

Fig. 7 Disturbed curves in PCC under different models

图 7 表明，采用本文所述分群指标对风电场分群得到 4 机等值模型，其初始运行点及波动趋势与详细模型基本一致。

### 3.2 算例分析

以华北地区某风电场为例，在 Matlab 中进行仿真分析，验证本文等值方法的准确性。该风电场包含 6 行 11 列共 66 台 1.5 MW 双馈风机，风机经 35 kV/690 V 箱式变压器汇集至集电线路。WT1—WT11，WT23—WT33，WT45—WT55 为恒电压控制，其余机组为定无功功率控制。风速采用组合风速模型，基本风速为 14 m/s，5 s 时加入阵风及渐变风，如图 8 所示，风向取 45°。由于桨距角调节存在惯性延时，仿真过程认为风机桨距角动作情况不发生变化。

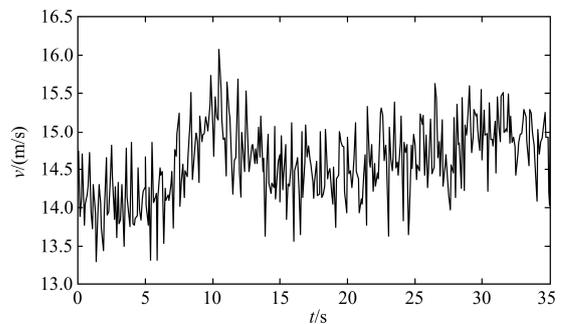


图 8 风速曲线

Fig. 8 Wind speed curve

考虑尾流效应计算各风机输入基本风速如表 3 所示。根据输入风速可判断 WT1—WT12, WT23, WT34, WT45, WT56 桨距角动作可划分为第一机群, 其余机组桨距角未动作划分为第二机群。

表 3 输入风速估算结果

风机编号	风速/(m/s)
1-12, 23, 34, 45, 56	14
13-22, 24, 35, 46, 57	12.5168
25-33, 36, 47, 58	11.1907
37-44, 48, 59	10.0051
49-55, 60	8.9452
61-66	7.9975

根据风机控制方式不同对风电场进行再次分群, 综合两次分群结果, 最终将风电场划分为 4 类, 结果如表 4 所示。

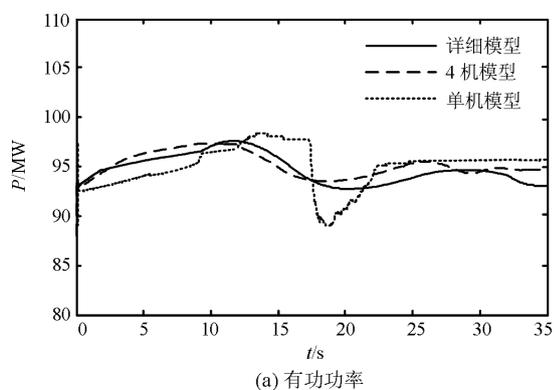
表 4 风机分群结果

分群序号	风机编号
1	WT1—WT11, WT23, WT45
2	WT12, WT34, WT56
3	WT46—WT55, WT24—WT33, WT20
4	WT13—WT22, WT35—WT44, WT57—WT66

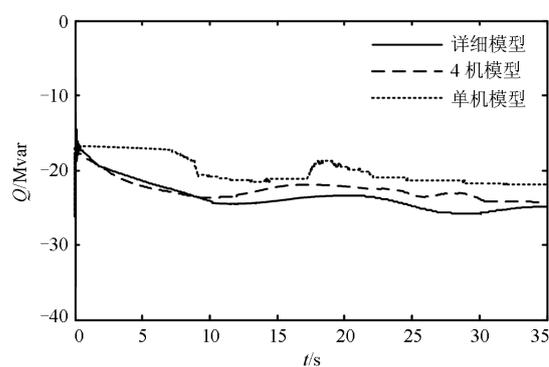
根据等值结果分别对 4 机等值模型、详细模型及单机等值模型进行仿真分析, 风电场并网点功率曲线如图 9 所示。

以详细模型为基准, 分别计算 4 机等值模型及单机等值模型的功率平均误差, 如表 5 所示。

图 9 和表 5 表明, 对于大型风电场, 本文 4 机等值模型的输出功率特性与详细模型一致并且拟合度较高; 与单机等值模型相比, 4 机等值模型更精确, 体现了合理分群的必要性。



(a) 有功功率



(b) 无功功率

图 9 风电场并网点有功、无功功率曲线

Fig. 9 Active and reactive power curves of PCC

表 5 功率误差分析

等值方法	有功功率平均误差(%)	无功功率平均误差(%)
4 机等值	3.09	5.16
单机等值	8.73	13.51

## 4 结论

风机等值的关键在于保证等值前后初始运行点和动态特性一致。由于空间位置不同, 风机间尾流效应影响输入风速, 进而影响风机初始运行点。风电场两种控制方式各有利弊, 混合控制能够实现优势互补, 具有更好的稳定性和动态特性。因此本文借鉴层次分析法, 考虑了风机间尾流效应及风机不同控制方式的影响, 采用两步分群法对风电机组进行多机等值。同时, 给出了风机输入风速及等值参数计算方法。

本文所述分群方法原理清晰, 与传统的单机等值相比, 得到的 4 机等值模型能够保证等值前后初始运行点一致, 并能准确地反映风电接入点动态输出特性, 对于大型双馈机组风电场等值建模分析同样适用。

## 参考文献

- [1] ZOU Jianxiao, PENG Chao, YAN Yan, et al. A survey of dynamic equivalent modeling for wind farm[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2014, 40: 956-963.
- [2] 张元, 郝丽丽, 戴嘉祺. 风电场等值建模研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(6): 138-146.  
ZHANG Yuan, HAO Lili, DAI Jiaqi. Overview of the equivalent model research for wind farms[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(6): 138-146.
- [3] 林俐, 赵会龙, 陈迎, 等. 风电场建模研究综述[J]. 现

- 代电力, 2014, 31(2): 1-10.  
LIN Li, ZHAO Huilong, CHEN Ying, et al. Research summary of wind farm modeling[J]. Modern Electric Power, 2014, 31(2): 1-10.
- [4] CHOWDHURY M A, SHEN W X, HOSSEINZADEH N, et al. A novel aggregated DFIG wind farm model using mechanical torque compensating factor[J]. Energy Conversion and Management, 2013, 67: 265-274.
- [5] LIU Hongzhi, CHEN Zhe. Aggregated modelling for wind farms for power system transient stability studies[C] // 2012 Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC). Shanghai, China: IEEE, March 27-29, 2012: 1-6.
- [6] 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.
- [7] ALI M, ILIE I S, MILANOVIC J V, et al. Wind farm model aggregation using probabilistic clustering[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2012, 28(1): 309-316.
- [8] 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 Baoyun. Study on dynamic equivalence model of wind farms with DFIG under wind turbulence[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(15): 1-6.
- [9] 徐玉琴, 张林浩, 王娜. 计及尾流效应的双馈机组风电场等值建模研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(1): 70-76.  
XU Yuqin, ZHANG Linhao, WANG Na. Study on equivalent model of wind farms with DFIG considering wake effects[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(1): 70-76.
- [10] 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 Zengqiang, SU Xunwen, 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.
- [11] 董建政, 李征, 蔡旭. 基于 RT-LAB 的双馈风电场动态建模[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(7): 83-89.  
DONG Jianzheng, LI Zheng, CAI Xu. Dynamic modeling of wind farm with doubly-fed induction generators based on RT-LAB[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(7): 83-89.
- [12] 倪林, 袁荣湘, 张宗包, 等. 大型风电场接入系统的控制方式和动态特性研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(8): 75-79.  
NI Lin, YUAN Rongxiang, ZHANG Zongbao, et al. Research on control method and dynamic characteristic of large wind farm integration[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(8): 75-79.
- [13] 黄伟, 张小珍. 基于特征分析的大规模风电场等值建模[J]. 电网技术, 2013, 37(8): 2271-2277.  
HUANG Wei, ZHANG Xiaozhen. Feature analysis based equivalent modeling for large-scale wind farms[J]. Power System Technology, 2013, 37(8): 2271-2277.
- [14] 范国英, 史坤鹏, 郑太一, 等. 风电场集群接入系统后的聚类分析[J]. 电网技术, 2011, 35(11): 62-66.  
FAN Guoying, SHI Kunpeng, ZHENG Taiyi, et al. Cluster analysis of grid-connected large scale wind farms[J]. Power System Technology, 2011, 35(11): 62-66.
- [15] 徐玉琴, 王娜. 基于聚类分析的双馈机组风电场动态等值模型的研究[J]. 华北电力大学学报, 2013, 40(3): 1-5.  
XU Yuqin, WANG Na. Study on dynamic equivalence of wind farms with DFIG based on clustering analysis[J]. Journal of North China Electric Power University, 2013, 40(3): 1-5.
- [16] 潘学萍, 张弛, 鞠平, 等. 风电场同调动态等值研究[J]. 电网技术, 2015, 39(3): 621-627.  
PAN Xueping, ZHANG Chi, JU Ping, et al. Coherency-based dynamic equivalence of wind farm composed of doubly fed induction generators[J]. Power System Technology, 2015, 39(3): 621-627.
- [17] 杨睿茜, 陈红坤, 陶玉波, 等. 双馈式风机控制器参数整定的实用方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(2): 63-69.  
YANG Ruixi, CHEN Hongkun, TAO Yubo, et al. A practical method on doubly-fed induction generator controller parameter determination[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(2): 63-69.

收稿日期: 2016-03-28; 修回日期: 2016-06-22

作者简介:

徐玉琴(1964-), 女, 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; E-mail: xuyuqin\_ncepu@126.com

刘丹丹(1992-), 女, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为风力发电并网分析。E-mail: ldandan2013@163.com

(编辑 魏小丽)