

8-13-2020

Dynamic Equivalent Modeling and Simulation of Wind Farm Based on ASW-FCM Algorithm

Mudan Li

1. Science & Technology College, North China Electric Power University, Baoding 071000, China;;2. College of Control and Computer Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071000, China;

Yinsong Wang

2. College of Control and Computer Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071000, China;

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Dynamic Equivalent Modeling and Simulation of Wind Farm Based on ASW-FCM Algorithm

Abstract

Abstract: A new dynamic equivalent modeling method is proposed for the wind farm of directly-driven wind turbine with permanent magnet synchronous generator (D-PMSG). The wake effect and wind direction change between multiple wind turbines are considered to calculate the effective input wind speed, *the effective wind speed, rotor speed, pitch angle and output power are selected as the multi-group indicators after analyzing the wind turbine operating characteristics. Considering the differences and relevance of the operating conditions between the turbines, an adaptive sample weighting fuzzy C-means clustering algorithm (ASW-FCM) is designed to optimally cluster the wind farm.* The clustered wind turbine group equivalent model is established based on the principle that the output characteristics before and after the equivalence are equal. A wind farm system is selected as the example of modeling and simulation to verify the rationality and accuracy of the equivalent modeling method.

Keywords

D-PMSG, wind farm, sample weighting, clustered grouping, equivalent modeling

Recommended Citation

Li Mudan, Wang Yinsong. Dynamic Equivalent Modeling and Simulation of Wind Farm Based on ASW-FCM Algorithm[J]. Journal of System Simulation, 2020, 32(8): 1606-1616.

基于 ASW-FCM 算法的风电场动态等效建模与仿真

李牡丹^{1,2}, 王印松²

(1. 华北电力大学科技学院, 河北 保定 071000; 2. 华北电力大学控制与计算机工程学院, 河北 保定 071000)

摘要: 针对直驱永磁风电机组风电场, 提出一种新的动态等效建模方法。考虑风电机组间的尾流效应和风向变化计算有效输入风速, 分析机组的运行特性, 以反映机组运行特征的有效风速、转速、桨距角和输出功率为多分群指标。考虑机组间运行状况的差异性和关联性, 设计自适应样本定权的模糊聚类算法(Adaptive Sample Weighting Fuzzy C-means, ASW-FCM)对风电场进行最优聚类分群。根据等效前后机组输出特性不变的原则建立聚类风电机组群的等效模型。以某实际风电场系统作为算例进行建模仿真, 验证所提等效建模方法的合理性和准确性。

关键词: 直驱永磁风电机组; 风电场; 样本定权; 聚类分群; 等效建模

中图分类号: TM621 文献标识码: A 文章编号: 1004-731X (2020) 08-1606-11

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.20-0117

Dynamic Equivalent Modeling and Simulation of Wind Farm Based on ASW-FCM Algorithm

Li Mudan^{1,2}, Wang Yinsong²

(1. Science & Technology College, North China Electric Power University, Baoding 071000, China;

2. College of Control and Computer Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071000, China)

Abstract: A new dynamic equivalent modeling method is proposed for the wind farm of directly-driven wind turbine with permanent magnet synchronous generator (D-PMSG). The wake effect and wind direction change between multiple wind turbines are considered to calculate the effective input wind speed, the effective wind speed, rotor speed, pitch angle and output power are selected as the multi-group indicators after analyzing the wind turbine operating characteristics. Considering the differences and relevance of the operating conditions between the turbines, an adaptive sample weighting fuzzy C-means clustering algorithm (ASW-FCM) is designed to optimally cluster the wind farm. The clustered wind turbine group equivalent model is established based on the principle that the output characteristics before and after the equivalence are equal. A wind farm system is selected as the example of modeling and simulation to verify the rationality and accuracy of the equivalent modeling method.

Keywords: D-PMSG; wind farm; sample weighting; clustered grouping; equivalent modeling

引言

风能作为一种清洁而稳定的新能源, 已被全球



收稿日期: 2020-03-10 修回日期: 2020-05-09;
基金项目: 国家自然科学基金联合基金(U1709211), 中央高校基本科研业务费专项资金面上项目(2020MS148);
作者简介: 李牡丹(1983-), 女, 山西阳城, 硕士, 讲师, 研究方向为新能源发电与先进控制理论; 王印松(1967-), 男, 河北河间, 博士, 教授, 研究方向为先进控制策略, 控制系统故障诊断技术等。

公认为提高能源安全、促进低碳经济增长的最佳方案^[1-2]。然而风电具有间歇性和波动性, 大规模风电并网给电力系统的安全稳定运行带来了新的挑战^[3-4]。在研究风电并网对电力系统的影响时, 需要建立有效的风电场模型^[5]。大规模风电场往往由上百台风机组成, 由于电力电子器件模型的复杂性、气象条件的差异性和空气动力学的不确定性导

<http://www.china-simulation.com>

• 1606 •

致各机组运行工况各不相同,若对每台风电机组进行系统详细的建模,不仅会增大模型阶数,更会使仿真和计算的复杂度大幅提升。因此,对风电场内机组进行合理聚类分群,建立模型结构简单且能准确表征风电并网输出特性的风电场等效模型尤为重要。

研究风速波动或电网故障情况下风电场的动态行为和风电场对电网的动态影响时,常采用动态等效建模法。目前风电场动态等效建模主要采用简化的等效模型,分为单机等值法和多机等值法。文献[6-8]采用传统的单机等值法建模,基于加权平均法将风电场内的所有风机用单台机表示。但由于风电场内风电机组实际运行状态各不相同,随着风电场规模的扩大,单机等值模型的精度逐渐不能满足研究需求。多机等值法是通过定义风电机组的分群指标,根据指标值的差异对风电机组进行分群,同群的风电机组等值为一台风力机。文献[9]根据来流风速的大小对风电机组进行分群,等效机组的风速为同群机组的等效风速,容量为所有同群机组容量的加权平均值。文献[10]考虑尾流效应计算风电机组的输入风速,按照风速对风电场内风电机组进行分群。文献[11]以地理位置作为分群指标,将同排机组划分为一个机群对风电场进行等效建模。文献[12]以双馈风电机组桨距角控制动作情况为分群原则,通过提取反映桨距角控制动作的特征向量对双馈风电机组进行动态分群。文献[13]采用特征分析法以交值轴暂态电势和发电机转速为分群指标,建立了风电场多机等值模型。文献[14]基于 DFIG 故障暂态过程的特点,建立了短路电流包络线轨迹结构相似度的评价指标,并以该指标进行同调机群划分。文献[15]针对鼠笼型风电场,采集不同工况和短路故障类型组合下风力发电机的转速向量,以概率最大原则对风电机组进行聚类分群。文献[16]以等值风力机与单台机组风力机的功率转换特性不变为原则,采用 fuzzy C-means clustering (FCM) 聚类算法对直驱式风电机组进行分群。文献[17]以机组实测功率为分群指标,采用

分裂层次半监督谱聚类算法对风电场进行分群。

上述文献在建立风电场等效模型时采用的分群指标较单一,然而受到地理条件、气象条件以及电力电子器件容量的限制,风电场内各机组运行工况各不相同。在分析风速波动或电网故障情况下风电场的动态行为时,采用单一的聚类指标进行风电场分群必然导致机组运行特征反映不全面和不精确。同时传统的聚类算法忽略了不同风电机组运行状况的差异性和关联性对聚类结果的贡献不同,导致分群结果不准确。

1 计及尾流效应和风向变化影响的风速模型

风电场内分布着大量风电机组,上游机组获取风能的同时会在下游形成一个尾流影响区,对下游风机产生遮挡作用。上下游风电机组距离越近,尾流影响效果越显著^[5]。

如图 1 所示,假设风向为 0° , 来流风速为 v_0 , 上游风机 WT1 处的风速为 v_0 , 尾流作用的中线为 l_1 , 受到尾流影响后下游风机 WT2 处的输入风速为:

$$v_i = v_0 \cdot \sigma(d, v_0) \quad (1)$$

式中: v_i 为下游风电机组的风速; d 为上下游风机之间的距离; $\sigma(d, v_0)$ 为上游风机处的风速衰减系数。

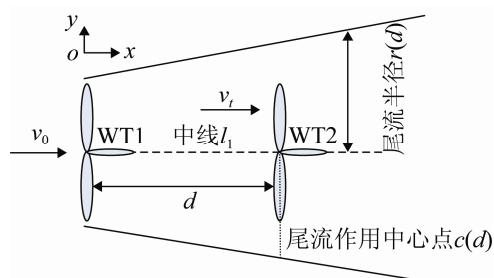


图 1 尾流效应模型图
Fig. 1 Wake effect model

根据 Jessen 模型,上游风机处的风速衰减系数为:

$$\sigma(d, v_0) = 1 - \frac{1}{2} C_T(v_0) \left/ \left(1 + \frac{d}{4R} \right) \right. \quad (2)$$

式中: C_T 为迎风速 v_0 条件下上游风机的推力系数,

由风机制造商给出； R 为风轮半径。

尾流作用范围由尾流作用的宽度和中心线决定，距离上游风机为 d 时的尾流作用半径为^[18]：

$$r(d) = (4R^2 + dR)^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

由此得尾流作用范围为：

$$S(d) = \{(x, y) | x = d, y \in w_y\} \quad (4)$$

式中： w_y 为尾流作用范围的宽度，假设 $c(d)$ 为尾流作用的中心点，则

$$w_y = [c(d) - r(d), c(d) + r(d)] \quad (5)$$

对风电场内风机按照上下游位置进行编号，在已知尾流作用范围和任一风机任意时刻的风速情况下，风机 k 处的迎面风速为：

$$v_k = v \sum_{i=1}^{k-1} \sigma_i(d_{i,k}, v) \quad (6)$$

式中： $d_{i,k}$ 为第 i, k 台风机之间的距离； v 为未计及尾流影响的风速序列。 $\sigma_i(d_{i,k}, v)$ 满足式(7)：

$$\sigma_i(d_{i,k}, v) = \begin{cases} 1, & y_k \notin [c_i(d) - r_i(d); c_i(d) + r_i(d)] \\ 1 - \frac{1}{2} C_T(v_i) / (1 + \frac{d_{i,k}}{4R}), & y_k \in [c_i(d) - r_i(d); c_i(d) + r_i(d)] \end{cases} \quad (7)$$

当风向变化时，风电场内各机组之间的尾流效应随之变化，机组的输入风速也相应改变。如图 2 所示，当风向由 0° 变为 φ 时，尾流作用的中线相应偏转 φ ，由原来的 l_1 变为 l_2 ，此时上游风机对下游风机的尾流作用半径变为：

$$r(\varphi) = r(0) \cdot \cos \varphi \quad (8)$$

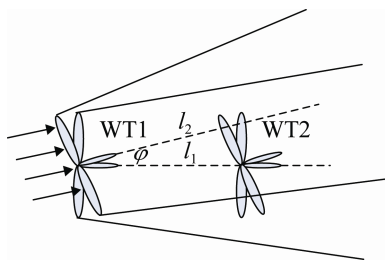


图 2 变风向下尾流作用范围图
Fig. 2 Wake effect range under wind direction change

通过旋转风电场模拟风向的改变。假设风向为 0° 时第 i, k 台机组在风电场的坐标分别为 $(x_i(0), y_i(0))$, $(x_k(0), y_k(0))$ ，则风电场旋转 φ 后相应机组

的位置坐标变为：

$$x_i(\varphi) = x_i(0) \cdot \cos \varphi - y_i(0) \cdot \sin \varphi \quad (9)$$

$$y_i(\varphi) = x_i(0) \cdot \sin \varphi + y_i(0) \cdot \cos \varphi$$

为简化风速模型，假设风电场中所有机组的位置均位于一象限，采用下式校正旋转 φ 后风电场内所有机组的坐标，校正公式为：

$$x_{ia}(\varphi) = x_i(\varphi) - \min(x_1(\varphi), x_2(\varphi), \dots, x_n(\varphi)) \quad (10)$$

$$y_{ia}(\varphi) = y_i(\varphi) - \min(y_1(\varphi), y_2(\varphi), \dots, y_n(\varphi))$$

由此，在风向变化时，依据式(10)即可重新确定风电场内所有机组的坐标以及尾流作用范围，并计算出各机组的有效输入风速。

2 D-PMSG 风电场聚类分群

2.1 D-PMSG 多分群指标选取

根据空气动力学原理，D-PMSG 的输出机械功率为^[19-20]：

$$\begin{cases} P_m = C_p(\lambda, \beta) P_{\text{wind}} = 0.5 \rho \pi R^2 v^3 C_p(\lambda, \beta) \\ C_p(\lambda, \beta) = (0.44 - 0.0167\beta) \sin\left[\frac{\pi(\lambda - 3)}{15 - 0.3\beta}\right] - 0.00184(\lambda - 3)\beta \\ \lambda = \omega_r R / v \end{cases} \quad (11)$$

式中： P_m 为风机的输出机械功率； ρ 为空气密度 (kg/m^3)； R 为风机叶片半径(m)； v 为风速(m/s)； C_p 为风能利用系数； λ 为叶尖速比； β 为桨距角($^\circ$)； ω_r 为风机转速(rad/s)。

受自身机械特性和元器件容量的限制以及运行过程中的转速和功率约束，风速不同时直驱式风电机组的运行特性呈现分区域特征，如图 3 所示。

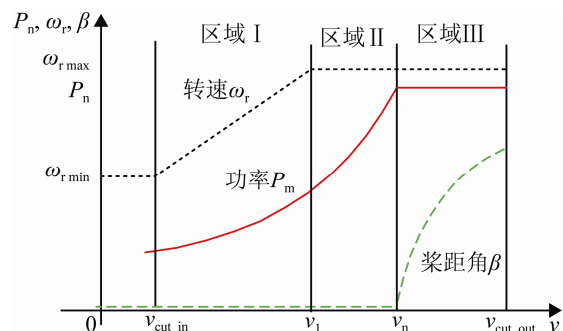


图 3 直驱式风电机组运行特性

Fig. 3 Operating characteristics of D-PMSG

(1) 恒桨距角变转速变功率区域

对应于图中区域 I。该区域输入风速处于 $v_{cut_in} \sim v_1$, 桨距角不参与工作, $\beta=0$ 。风机实现最大功率跟踪, 转速 ω_r 和输出功率 P_m 均随风速升高而增大, 且输出功率与转速的立方成正比。

(2) 恒桨距角恒转速变功率区域

对应于图中区域 II。该区域输入风速处于 $v_1 \sim v_n$, 受限于风机本身的机械强度等因素, 风机转速基本达到额定转速 ω_{max} , 桨距角 $\beta=0$ 。随着风速 v 的增加, 输出功率 P_m 继续增大。

(3) 恒转速恒功率变桨距角区域

对应于图中区域 III。该区域输入风速处于 $v_n \sim v_{cut_out}$, 由于机组机械和电气特性的约束, 需要调节桨距角限制输出的机械功率, 此时 $\beta \neq 0$, 风机转速达到额定转速 ω_{max} 保持恒定, 输出功率也达到额定功率 P_n 并保持恒定。

根据上述对 D-PMSG 运行特性的分析可知, 3 个区域的运行特征均可由风速、风机转速、桨距角和输出功率来描述, 因此选取风速 v 、风机转速 ω_r 、桨距角 β 和输出功率 P_m 作为 D-PMSG 风电机组的多分群指标。

2.2 ASW-FCM 聚类分群算法

2.2.1 FCM 聚类算法

FCM (Fuzzy C-means) 算法^[21]是一种基于对具有模糊性或不确定性的事物进行描述和划分的方法, 其基本思想是将待测样本集分成若干类, 为每个样本增加一个隶属度表示该样本隶属于各个类的程度, 由此得到一个隶属度矩阵, 通过迭代计算不断更新隶属度矩阵及聚类中心矩阵, 以使目标函数达到最小。

设数据集 $X=\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ 是待分析样本的全体, 其中, $x_j=\{x_{j1}, x_{j2}, \dots, x_{jl}\}$ 表示第 j 个样本的 l 个特征值。若将样本数据分为 C 个类, FCM 目标函数定义为:

$$\min J_m(U, Z) = \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^C (u_{ij})^m d^2(x_j, z_i) \quad (12)$$

约束条件为:

$$\begin{cases} 0 \leq u_{ij} \leq 1 \\ \sum_{j=1}^n u_{ij} = 1, (j=1, 2, \dots, n) \end{cases} \quad (13)$$

式中: $J_m(U, Z)$ 为目标函数; $U(C \times n)$ 为隶属度矩阵; U 中元素 u_{ij} 为隶属度, 表示集合 X 中样本 x_j 隶属于第 i ($1 \leq i \leq C$) 类的程度; 聚类中心 $Z=(z_1, z_2, \dots, z_i, \dots, z_C)$ 是 $C \times l$ 矩阵, z_i 为第 i 类的聚类中心; m 为模糊隶属度指数; $d^2(x_j, z_i) = \|x_j - z_i\|^2$ 表示第 j 个样本点 x_j 到第 i 个聚类中心 z_i 的距离。隶属度 u_{ij} 和聚类中心 z_i 采用公式(14)(15)进行更新:

$$u_{ij} = \left(\sum_{r=1}^C \left(\frac{\|x_j - z_i\|^2}{\|x_j - z_r\|^2} \right)^{\frac{1}{m-1}} \right)^{-1}, i=1, 2, \dots, C \quad (14)$$

$$z_i = \frac{\sum_{j=1}^n (u_{ij})^m \cdot x_j}{\sum_{j=1}^n (u_{ij})^m}, i=1, 2, \dots, C \quad (15)$$

2.2.2 ASW-FCM 聚类算法

大型 D-PMSG 风电场通常由成百上千台机组组成, 由于排列方式、风速分布、尾流效应、地形地貌等存在较大差异, 机组的运行状况各不相同。同时由于尾流效应的影响, 机组的风速间也存在一定的关联性。传统的 FCM 算法在对风电机组进行聚类分群时, 对所有的风电机组一视同仁, 忽略了不同风电机组运行状况的差异性和关联性对聚类结果的贡献程度。基于此, 本文给风电场内运行状况不同的机组和机组参数分配了不同的权值和权值指数, 用来表示机组运行特征的差异性和关联性, 设计了自适应样本定权的模糊聚类算法 (ASW-FCM) 对风电机组进行分群, 提高聚类分群的质量。

ASW-FCM 算法的目标函数定义为:

$$\min J_m(U, Z) = \sum_{i=1}^C \sum_{j=1}^n \omega_j^p (u_{ij})^m \sum_{k=1}^l \omega_k^q d^2(x_{jk}, z_{ik}) \quad (16)$$

约束条件为:

$$\begin{cases} 0 \leq u_{ij} \leq 1 \\ \sum_{i=1}^C u_{ij} = 1, (j=1, 2, \dots, n) \\ \prod_{j=1}^n \omega_j = 1 \\ \sum_{k=1}^l \omega_k = 1 \end{cases} \quad (17)$$

式中： $\omega_j(j=1, 2, \dots, n)$ 为给每个样本 x_j 分配的权值，其取值反映了样本 x_j 对目标函数的影响程度，全体样本的权值 ω_j 满足乘积为 1 的约束条件，反映了全体样本数据之间的关联性； p 为事先给定的样本权值指数，用来调节样本权值的取值。 $\omega_k(k=1, 2, \dots, l)$ 为给每个样本特征 x_{jk} 分配的权值，其取值反映了样本特征 x_{jk} 对样本数据 x_j 的作用，任一样本所有特征的权值 ω_k 满足和为 1 的约束条件，反映了样本特征之间的关联性； q 为样本特征权值指数，调节其取值使目标函数达到最小。采用拉格朗日算法解出样本权值 ω_j 和样本特征权值 ω_k 的迭代公式：

$$\omega_j = \left[\frac{\left[\prod_{j=1}^n \left(\sum_{i=1}^C (u_{ij})^m \sum_{k=1}^l \omega_k^q \|x_{jk} - z_{ik}\|^2 \right) \right]^{\frac{1}{n}}}{\sum_{i=1}^C (u_{ij})^m \sum_{k=1}^l \omega_k^q \|x_{jk} - z_{ik}\|^2} \right]^{\frac{1}{p}} \quad (18)$$

$$\omega_k = \left[\frac{\left[\sum_{k=1}^l \left(\sum_{i=1}^C \sum_{j=1}^n \omega_j^p (u_{ij})^m \|x_{jk} - z_{ik}\|^2 \right) \right]^{\frac{1}{q}}}{\sum_{i=1}^C \sum_{j=1}^n \omega_j^p (u_{ij})^m \|x_{jk} - z_{ik}\|^2} \right]^{\frac{1}{q}} \quad (19)$$

模糊隶属度和聚类中心的更新公式变为：

$$u_{ij} = \left(\sum_{r=1}^C \left(\frac{\sum_{k=1}^l \omega_k^q \|x_{jk} - z_{rk}\|^2}{\sum_{k=1}^l \omega_k^q \|x_{jk} - z_{rk}\|^2} \right)^{\frac{1}{m-1}} \right)^{-1}, \quad i=1, 2, \dots, C \quad (20)$$

$$z_{ik} = \frac{\sum_{j=1}^n (u_{ij} \cdot \omega_j^{p/m})^m \cdot x_{jk}}{\sum_{j=1}^n (u_{ij} \cdot \omega_j^{p/m})^m}, i=1, 2, \dots, C \quad (21)$$

为确保聚类分群结果的准确性和客观性，计算聚类评价指标 $V_{XB}^{[22]}$ ， V_{XB} 值越小，聚类分群效果越好。对于由 n 台 D-PMSG 机组组成的风电场，基

于 ASW-FCM 算法的风电场聚类分群具体步骤为：

step 1: 由计算出的机组有效风速和由风电场 SCADA 系统获取的初始转速、桨距角和输出功率，形成样本数据集 X ；

step 2: 初始化聚类数 C ，样本个数 n ，目标函数精度 ε ，模糊指数 m ，初始模糊聚类中心 z_i ，样本权值 ω_j ，样本特征权值 ω_k ，样本权值指数 p ，样本特征权值指数 q ；

step 3: 利用式(18)~(19)更新样本权值 ω_j 和样本特征权值 ω_k ；

step 4: 用式(20)~(21)更新隶属度 u_{ij} 和聚类中心 z_i ；

step 5: 利用式(16)计算目标函数 $J_m(U, Z)$ ，若 $|J(t)-J(t-1)| < \varepsilon$ 或迭代次数达到 T_m 则停止；否则， $t \leftarrow t+1$ ，转 step 3；

step 6: 计算聚类评价指标 V_{XB} 和聚类数 $C=C+1$ ，如果 $C > \sqrt{n}$ ($C \in [2, \sqrt{n}]$)^[22]，转 step 7；否则，转 step 1 重新开始计算；

step 7: 计算最优聚类数目 $C_{opt} = \min(V_{XB})$ ，输出 D-PMSG 风电场机组聚类分群结果。

3 聚类风电机群等效模型

假设风电场内包括 n 台同型号的 D-PMSG 机组，采用 ASW-FCM 算法将风电机群聚类成 C 个机群，根据等效前后机组输出特性不变的原则，将每个机群等效为一台机组，建立等效机组各部分的模型。

3.1 等效风力机模型

假设同一风电机群中有 k 台同型号的 D-PMSG 风电机组，则等效风速为：

$$v_{eq} = \left(\frac{1}{k} \sum_{i=1}^k v_i^3 \right)^{1/3} \quad (22)$$

式中： v_{eq} 为聚类风电机群等效风力机的风速； v_i 为同群中第 i 台机组计及尾流效应和风向变化的有效输入风速。等效转速为：

$$\omega_{eq} = \left(\frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \omega_i^3 \right)^{1/3} \quad (23)$$

式中: ω_{eq} 为聚类风电机群等效风力机的转速; ω_i 为同群中第 i 台机组的转速。

3.2 等效发电机模型

假设同一风电机群内有 k 台同型号的 D-PMSG 风电机组, 采用容量加权法计算等效发电机模型的参数, 如式(24)所示:

$$\begin{cases} S_{eq} = \sum_{i=1}^k S_i, P_{eq} = \sum_{i=1}^k P_i \\ X_{s_eq} = X_s/k, R_{s_eq} = R_s/k \end{cases} \quad (24)$$

式中: $S_{eq}, P_{eq}, X_{s_eq}, R_{s_eq}$ 分别为聚类风电机群等效发电机的额定容量、有功功率、定子阻抗和定子电阻; S_i, P_i, X_s, R_s 分别为同群内各发电机的额定容量、有功功率、定子阻抗和定子电阻。

3.3 等效轴系模型

聚类风电机群的轴系模型采用单质块模型进行等效, 等效的轴系模型参数为:

$$H_{eq} = \sum_{i=1}^k H_i, K_{eq} = \sum_{i=1}^k K_i, D_{eq} = \sum_{i=1}^k D_i \quad (25)$$

式中: H_{eq}, K_{eq}, D_{eq} 分别为等效轴系的转动惯性时间常数、刚度系数和阻尼系数。

3.4 等效变压器模型

聚类风电机群的等效变压器模型参数为:

$$S_{T_eq} = \sum_{i=1}^k S_{Ti}, Z_{T_eq} = Z_T/k \quad (26)$$

式中: S_{T_eq}, Z_{T_eq} 分别为等效变压器的额定容量和电抗。

3.5 等效集电线路模型

风电场集电线路包括架空线路和电缆 2 种, 对于放射式集电线路, 等效阻抗为:

$$Z_{eq} = \frac{P_1^2 Z_1 + P_2^2 Z_2 + \dots + P_k^2 Z_k}{(P_1 + P_2 + \dots + P_n)^2} = \frac{\sum_{i=1}^k P_i^2 Z_i}{(\sum_{i=1}^k P_i)^2} \quad (27)$$

对于干线式集电线路, 等效阻抗为:

$$Z_{eq} = \frac{\sum_{i=1}^k (\sum_{m=1}^i (Z_m \sum_{j=m}^k P_j) P_i)}{(\sum_{i=1}^k P_i)^2} \quad (28)$$

式中: Z 为集电线路阻抗。

对于电缆线路, 忽略风电场内的电压差异, 则等效对地导纳为:

$$B_{eq} = \sum_{i=1}^k B_i \quad (29)$$

式中: B 为电缆线路电纳。

4 仿真算例

本文以某实际风电场系统作为算例进行建模仿真, 如图 4 所示。

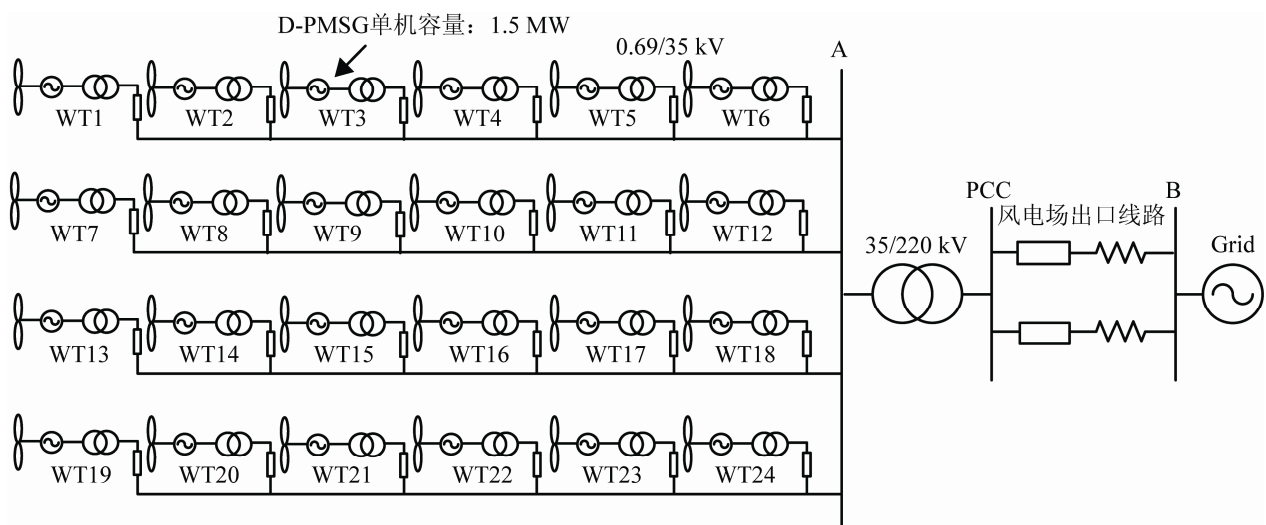


图 4 风电场系统图

Fig. 4 Diagram of wind farm system

该风电场由 24 台金风 GW82/1500 直驱式风电机组组成, 机组额定容量 1.5 MW, 轮毂高 70 m, 风轮半径 82.34 m, $v_{cut_in}=3$ m/s, $v_n=10.3$ m/s, $v_{cut_out}=22$ m/s, $\omega_{rmax}=17.3$ rpm。各风电机组由 0.69/35 kV 的机端变压器升压后, 经集电线路汇聚于 35 kV 风电场出口母线 A 处, 再经 35kV/220 kV 出口变压器升压后, 经出口线路接至大电网。风电场内发电机、变压器及电缆参数如表 1 所示。

表 1 风电场内设备及集电线路参数

Tab. 1 Parameters of equipments and collecting lines in wind farm

设备及线路	参数	数值
发电机	额定功率/MW	1.5
	额定转速/(r/min)	17.3
	定子电阻/pu	0.028 36
	定子电感/pu	0.1
机端变压器	额定容量/MVA	1.6
	阻抗/pu	25.5
出口变压器	额定容量/MVA	50
	阻抗/pu	500
单位电缆	电阻(Ω /km)	0.17
	电抗(Ω /km)	0.365

当风电场内来流风速为 10.69 m/s, 风向为 45° 时, 考虑到尾流效应和风向变化的影响, 根据坐标校正公式计算出各机组的初始输入风速。机组初始风速、转速、桨距角和输出功率值如表 2 所示。

设置初始聚类数 $C=2$, 样本个数 $n=24$, 目标函数精度 $\varepsilon=0.000 1$, 模糊指数 $m=2$, 初始模糊聚类中心取 24 台机组初始数据的平均值, 即 $z_1(0)=(9.31$ m/s, 0.92 p.u., $1 091.24$ kW, 2.43°), $z_2(0)$ 取距离聚类中心 $z_1(0)$ 最近的一个样本数据, 即 $z_2(0)=(9.32$ m/s, 0.96 p.u., $1 158.36$ kW, 0°), 初始样本权值 $\omega_j=\{1,1,\dots,1\}_{1\times 24}$, 权值指数 $p=8$, 初始样本特征权值 $\omega_k=\{0.25,0.25,0.25,0.25\}$, 权值指数 $q=2$ 。采用 2.2 节 ASW-FCM 聚类算法将 24 台风电机组分为 4 个机群, 即 $C_{opt}=4$, 进而得到以有效风速、转速、桨距角和输出功率作为多分群指标的聚类分群结果, 如表 3 所示。

表 2 各机组初始变量值

Tab. 2 Initial variable values of each wind turbine

机组	风速/(m/s)	转速/(p.u.)	桨距角/ $^\circ$	功率/kW
1	10.69	1	5.73	1 452.35
2	10.69	1	5.73	1 452.35
3	10.69	1	5.73	1 452.35
4	10.69	1	5.73	1 452.35
5	10.69	1	5.73	1 452.35
6	10.69	1	5.73	1 452.35
7	10.69	1	5.73	1 452.35
8	9.98	1	2.28	1 302.28
9	9.32	0.96	0	1 158.36
10	8.83	0.90	0	889.62
11	8.34	0.86	0	785.17
12	7.6	0.78	0	650.1
13	10.69	1	5.73	1 452.35
14	9.83	1	2.28	1 288.97
15	9.02	0.94	0	1014.8
16	8.54	0.88	0	861.4
17	7.85	0.82	0	708.22
18	7.06	0.72	0	490.22
19	10.69	1	5.73	1 452.35
20	9.7	1	2.28	1 236.27
21	8.86	0.92	0	920.68
22	7.76	0.80	0	692.97
23	7.48	0.76	0	667.46
24	6.95	0.71	0	452.01

表 3 ASW-FCM 聚类分群结果

Tab. 3 Result of grouping by ASW-FCM algorithm

聚类风电机组	聚类结果
机群 1	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 13, 14, 19, 20
机群 2	9, 10, 15, 16, 21
机群 3	11, 12, 17, 22
机群 4	18, 23, 24

为进行对比和分析, 基于相同的分群指标, 采用传统 FCM 聚类算法^[16]的分群结果见表 4; 采用分裂层次半监督谱聚类算法, 以输出功率为分群指标^[17]的聚类结果见表 5; 基于相同的聚类算法, 以风速为分群指标^[9]的聚类结果见表 6。

表 4 传统 FCM 聚类分群结果

Tab. 4 Result of grouping by traditional FCM algorithm

聚类风电机组	聚类结果
机群 1	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 13, 14, 19, 20
机群 2	9, 10, 15, 21
机群 3	11, 16, 17, 22
机群 4	12, 18, 23, 24

表 5 分裂层次半监督谱聚类分群结果
Tab. 5 Result of grouping by semi-supervised split-hierarchical spectral clustering algorithm

聚类风电机组	聚类结果
机群 1	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 13, 19
机群 2	9, 10, 11, 14, 15, 16, 17, 20, 21
机群 3	12, 18, 22, 23, 24

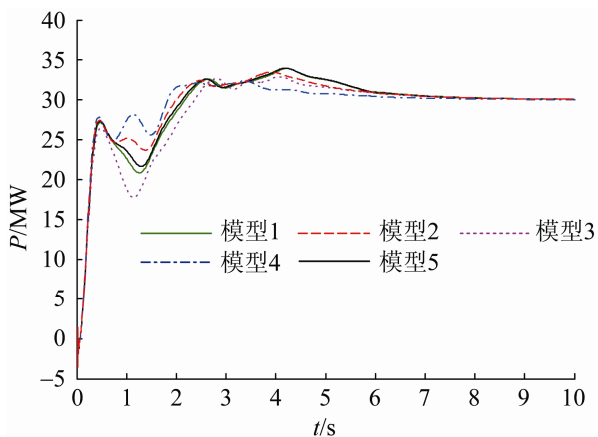
表 6 风速分群结果
Tab. 6 Result of grouping by wind speed

聚类风电机组	聚类结果
机群 1	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 13, 19
机群 2	8, 9, 14, 15, 20
机群 3	10, 11, 16, 21
机群 4	12, 17, 18, 22, 23, 24

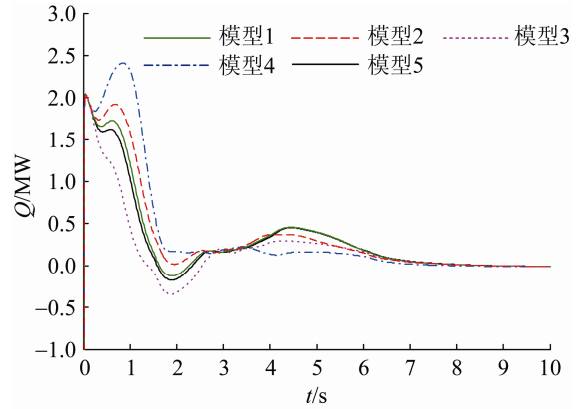
为验证本文提出的基于 ASW-FCM 算法的风电场等效建模方法的合理性和准确性, 根据聚类分群结果, 在 Matlab/Simulink 仿真平台上分别搭建了 ASW-FCM 4 机等效模型(模型 1)、传统 FCM 4 机等效模型(模型 2)、分裂层次半监督谱聚类 3 机等效模型(模型 3)、以风速分群的 4 机等效模型(模型 4)和详细模型(模型 5), 在风速扰动及电网故障情况下对风电场出口母线 A 处的输出功率和电压进行仿真验证。

4.1 渐变风扰动仿真

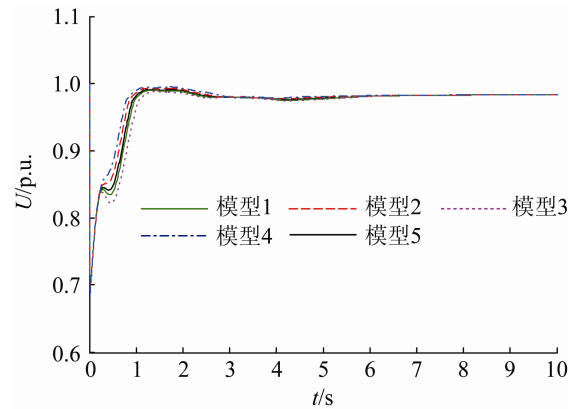
仿真时间为 10 s, 在 $t=1$ s 时风速由 8 m/s 呈斜坡变化, 斜率为 1 m/s, 持续时间为 3 s, 风速达到 11 m/s 时保持不变。仿真得到风电场出口处的有功功率 P 、无功功率 Q 、出口电压 U 的变化曲线见图 5。



(a) 有功功率曲线



(b) 无功功率曲线



(c) 电压曲线

图 5 风速扰动下风电场出口变量响应

Fig. 5 Variable responses at the exit of wind farm in wind speed fluctuation

可见, 在风速扰动条件下, 4 种等效模型均表现出与详细模型基本一致的响应趋势。但是与其它 3 种等效模型相比, 采用本文方法建立的 ASW-FCM 4 机等效模型在有功功率、无功功率和输出电压上与详细模型更接近。表 7 给出了风速扰动下 4 种等效模型与详细模型之间的输出误差。

Comparisons of 4 equivalent models and detailed model

表 7 风速扰动下 4 种等效模型与详细模型的误差
Tab. 7 Errors of 4 equivalent models and detailed model in wind speed fluctuation /%

等效模型	有功功率 误差 E_P	无功功率 误差 E_Q	电压误差 E_U
模型 1	1.51	2.38	0.73
模型 2	3.35	4.84	0.92
模型 3	4.47	5.25	1.36
模型 4	4.52	5.69	1.50

文中 E_P , E_Q , E_U 的计算公式如下:

$$E_P = \frac{\int_{t_1}^{t_2} |P_i(t) - P(t)| dt}{\int_{t_1}^{t_2} |P(t)| dt}$$

$$E_Q = \frac{\int_{t_1}^{t_2} |2(Q_i(t) - Q(t))| dt}{\int_{t_1}^{t_2} |S - 2Q(t)| dt}$$

$$E_U = \frac{\int_{t_1}^{t_2} |U_i(t) - U(t)| dt}{\int_{t_1}^{t_2} |U(t)| dt}$$

式中: $P(t)$, $Q(t)$ 和 $U(t)$ 分别为风电场出口处详细模型在 t 时刻的有功功率、无功功率和电压; $P_i(t)$, $Q_i(t)$ 和 $U_i(t)$ 分别为 t 时刻第 i 个等效模型的有功功率、无功功率和电压; t_1 和 t_2 为计算误差的时间起点和终点; S 为整个风电场的装机容量。

可见, 与模型 2、模型 3 和模型 4 相比, 模型 1 (ASW-FCM 4 机等效模型) 在 E_P , E_Q , E_U 上与详细模型之间的误差最小, 因此模型 1 能更准确地反映风速扰动下风电场的实际动态特性。一方面, ASW-FCM 4 机等效模型在进行机群划分和等效时同时考虑了所有机组的风速、转速、桨距角和输出功率特征。实际上, 风电场内不同机组在不同区域的运行状态都可以由风速、转速、桨距角和输出功率来反映, 因此选择以上 4 个变量作为分群指标是合理可行的。另一方面, ASW-FCM 聚类算法给不同的机组分配了不同的权值和权值指数, 能够反映出机组运行状况的差异性和尾流效应导致的风速关联性对聚类结果的贡献程度。而采用传统 FCM 聚类算法的等效模型视同群机组对聚类的贡献一致, 采用分裂层次半监督谱聚类算法的等效模型和以风速分群的等效模型分群指标单一, 不能全面反映不同机组的运行特性, 因此, 在有功功率、无功功率和输出电压上与详细模型相差较大。

4.2 电网侧三相短路故障仿真

仿真时间为 30 s, $t=5$ s 时在电网侧加入三相短路故障, 持续 0.1 s 后故障切除。假设故障期间风电机组的有效输入风速不变, 仿真得到风电场出

口处的有功 P 、无功 Q 、电压 U 的变化曲线见图 6。

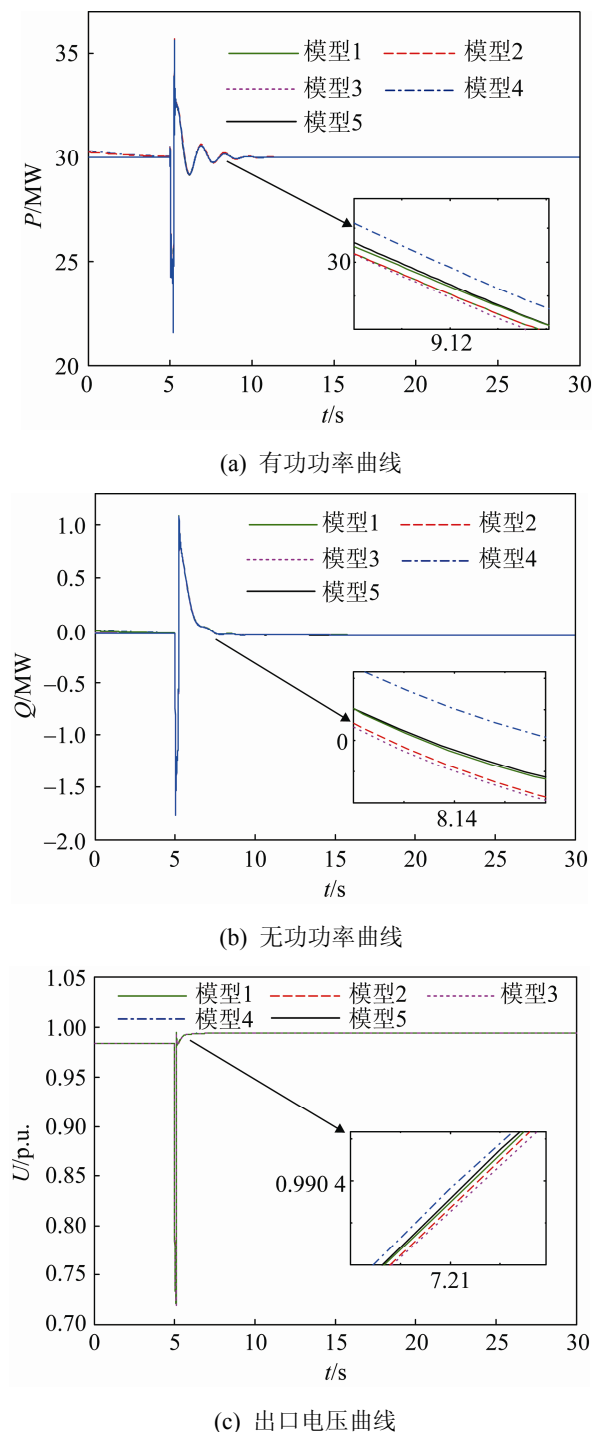


图 6 故障条件下风电场出口变量响应

Fig. 6 Variable responses at the exit of wind farm in grid fault condition

由图 6 可知, 在电网侧三相短路故障条件下, 4 种等效模型均表现出与详细模型几乎一致的响应趋势。但是从放大部分的响应曲线中可以看出,

与模型 2、模型 3、模型 4 相比, 模型 1 (ASW-FCM 4 机等效模型) 与详细模型在有功功率、无功功率和电压的变化曲线上几乎重合。表 8 给出了三相短路故障时 4 种等效模型与详细模型之间的输出误差。

表 8 三相短路故障 4 种等效模型与详细模型的误差
Tab. 8 Errors of 4 equivalent models and detailed model in grid fault condition /%

等效模型	有功功率 误差 E_P	无功功率 误差 E_Q	电压误差 E_U
模型 1	0.48	0.53	0.21
模型 2	1.12	1.74	0.47
模型 3	1.43	2.36	0.58
模型 4	1.56	3.12	0.49

可见, 与模型 2、模型 3 和模型 4 相比, 模型 1 (ASW-FCM 4 机等效模型) 在 E_P , E_Q , E_U 上与详细模型之间的误差最小, 所以模型 1 的精度更高。事实上, 在三相短路故障发生时由于传动系统中积聚能量的释放, 机组转速和输出功率相应提高。风速越高, 传动系统中积聚的能量越多, 故障持续时间越长, 转速和输出功率的波动越明显。而当转速超过额定转速时还需要同时调节桨距角。显然, 故障发生时的风速、转速、桨距角和输出功率会影响机组的动态特性。因此, 风速、转速、桨距角和输出功率 4 个分群指标能更准确地反映故障发生时机组的运行特性。另外, 故障时不同机组的运行状态不同, 同群内不同机组对聚类结果的贡献程度不等。因此, 基于 ASW-FCM 聚类算法建立的等效模型能更准确地反映故障发生时风电场的实际动态特性。

5 结论

本文针对直驱永磁风电机组风电场提出了一种基于 ASW-FCM 算法的动态等效建模方法。该方法以反映机组运行特征的有效风速、转速、桨距角和输出功率为分群指标, 采用自适应样本定权的模糊聚类算法进行风电场的最优聚类分群, 并建立了聚类风电机组群的等效模型。仿真结果表明, 与传统的基于 FCM 聚类算法的等效模型、基

于分裂层次半监督谱聚类算法的等效模型、按风速特征分群建立的等效模型相比, 采用本文方法建立的风电场等效模型在风速扰动和电网故障条件下的输出有功功率、无功功率和出口电压与详细模型更接近, 能更准确地反映直驱机组风电场接入点的动态特性。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. 风电发展“十三五”规划[R]. 北京: 中华人民共和国国家能源局, 2016.
National Development and Reform Commission. “13th Five-Year Plan” for Wind Power Development[R]. Beijing: National Energy Administration of the People's Republic of China, 2016.
- [2] 刘振亚. 全球能源互联网[M]. 北京: 中国电力出版社, 2015: 260-261.
Liu Zhenya. Global Energy Internet[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2015: 260-261.
- [3] 宋恒东, 董学育. 风力发电技术现状及发展趋势[J]. 电工电气, 2015(1): 1-4.
Song Hengdong, Dong Xueyu. Discussion on Present Situations and Development Trends of Wind Power Generation Technology[J]. Electrotechnics Electric, 2015(1):1-4.
- [4] 孙元存, 刘三明, 王致杰, 等. 大规模风电接入对电力系统动态特性影响的研究[J]. 系统仿真技术, 2016, 12(2): 83-87.
Sun Yuancun, Liu Sanming, Wang Zhijie, et al. Study of the Impact of Large-scale Wind Power Access to Dynamic Characteristics of Power System[J]. System Simulation Technology, 2016, 12(2): 83-87.
- [5] 曹娜, 于群. 风电场建模技术及应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2015: 3.
Cao Na, Yu Qun. Wind Farm Modeling Technology and Application[M]. Beijing: China Machine Press, 2015: 3.
- [6] 胡杰, 余贻鑫. 电力系统动态等值参数聚合的实用方法[J]. 电网技术, 2006, 33(24): 26-30.
Hu Jie, Yu Yixin. A Practical Method of Parameter Aggregation for Power System Dynamic Equivalence[J]. Power System Technology, 2006, 33(24): 26-30.
- [7] 孙建锋, 焦连伟, 吴俊玲, 等. 风电场发电机动态等值问题的研究[J]. 电网技术, 2004, 28(7): 100-105.
Sun Jianfeng, Jiao Lianwei, Wu Junling, et al. Research on Multi-Machine Dynamic Aggregation in Wind farm[J]. Power System Technology, 2004, 28(7): 100-105.

- [8] 乔嘉赓, 鲁宗相, 闵勇. 风电场并网的新型实用等效方法[J]. 电工技术学报, 2009, 24(4): 209-214.
Qiao Jiageng, Lu Zongxiang, Min Yong. New Dynamic Equivalence Method for Grid-Connected Wind Farm[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(4): 209-214.
- [9] Fernandez L M, Garcia C A, Saenz J R, et al. Equivalent Models of Wind Farms by Using Aggregated Wind Turbines and Equivalent Winds[J]. Energy Conversion and Management (S0196-8904), 2009, 50(3): 691-704.
- [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 System, 2012, 36(2): 42-46.
- [11] Liu H Z, Chen Z. Aggregated Modeling for Wind Farms for Power System Transient Stability Studies[C]. Proceedings of 2012 Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (S2157-4839). Shanghai, China: IEEE, 2012: 1-6.
- [12] 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 System, 2010, 34(17): 72-77.
- [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] 欧阳金鑫, 刁艳波, 郑迪, 等. 基于电流轨迹相似度的双馈风电机组电磁暂态同调分群方法[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(10): 2896-2904.
Ouyang Jinxin, Diao Yanbo, Zheng Di, et al. A Clustering Method of Coherent Generators During Electromagnetic Transient Process Based on Similar Degrees of Current Trajectories for Doubly Fed Wind Farms[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(10): 2896-2904.
- [15] 朱乾龙, 韩平平, 丁明, 等. 基于聚类-判别分析的风电场概率等值建模研究[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(28): 4770-4780.
Zhu Qianlong, Han Pingping, Ding Ming, et al. Probabilistic Equivalent Model for Wind Farms Based on Clustering-discriminant Analysis[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(28): 4770-4780.
- [16] 高峰, 赵东来, 周孝信. 直驱式风电机组风电场动态等值[J]. 电网技术, 2012, 36(12): 222-227.
Gao Feng, Zhao Donglai, Zhou Xiaoxin. Dynamic Equivalent Algorithm for Wind Farm Composed of Direct-Drive Wind Turbines[J]. Power System Technology, 2012, 36(12): 222-227.
- [17] 林俐, 潘险险. 基于分裂层次半监督谱聚类算法的风电场机群划分方法[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(2): 8-14.
Lin Li, Pan Xianxian. Wind turbine grouping based on semi-supervised split-hierarchical spectral clustering algorithm for wind farm[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(2): 8-14.
- [18] Hansen A D, Jauch C, Sorensen P. Dynamic Wind Turbine Models in Power System Simulation Tool Digsilent [M]. Risø National Laboratory, Risø, Denmark, Tech. Rep. Risø-R-400(EN), Aug, 2007.
- [19] 杨骏华. 直驱型永磁同步风电系统的控制策略研究[D]. 成都: 西华大学, 2017.
Yang Junhua. Research on control strategy of direct drive permanent magnet synchronous wind power system[D]. Chengdu: Xihua University, 2017.
- [20] 于永生, 冯延晖, 江红鑫, 等. 海上风电经VSC-MTDC 并网研究[J]. 高压电器, 2015, 51(10): 24-33.
Yu Yongsheng, Feng Yanhui, Jiang Hongxin, et al. Research on offshore wind farm integration via VSCMTDC[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(10): 24-33.
- [21] 赵兵, 汤涌, 张文朝. 感应电动机群单机等值算法研究[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(19): 43-49.
Zhao Bing, Tang Yong, Zhang Wenchao. Study on single-unit equivalent algorithm of induction motor group[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(19): 43-49.
- [22] Xie X, Beni G. A Validity Measure for Fuzzy Clustering [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence (S0162-8828), 1991, 13(8): 841-847.
- [23] Yu J, Cheng Q. The Search Range of Optimal Clustering Number in Fuzzy Cluster Method[J]. Sci China Ser E (S1006-9321), 2002, 32(2): 274-280.