

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2016.05.024

## 考虑空间相关性的风电场等值方法

刘 畅, 刘天琪, 何 川

(四川大学电气信息学院, 成都 610065)

**摘要:** 由于大规模风电场的复杂性,对风电场的每台风电机组建立详细的模型将大大增加仿真的计算量,因此需要对风电场进行等值化简。在分析了风电场风电机组之间尾流效应、海拔高度、空间遮挡和机组停运等相互作用的基础上,推导出能够表征风电机组空间相关性的相关性系数,并以此为分群指标运用K-means聚类算法对风电机组进行分群。K-means聚类算法需要事先给出聚类个数,针对此问题对K-means聚类方法进行了改进,提出了有效性指标来确定最优分群数,并给出了等值模型的参数计算方法,得到了风电场的多机等值模型。通过算例仿真表明,该方法具有较高的精度,对K-means方法的改进也具有一定的有效性。

**关键词:** 风电场;等值模型;空间相关性;聚类算法

### Equivalent Model of Wind Farms Considering Spatial Correlation

LIU Chang, LIU Tianqi, HE Chuan

(School of Electrical Engineering and Information, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

**Abstract:** With the complexity of large-scale wind farm, modeling for each turbine in wind farm will lead to excessive computing. Wind farm need to be simplified. This paper infers the correlation coefficient which can reflect spatial correlation between wind turbines on the basis of study on wake effect, altitude, shelter of and outage of turbine. The correlation coefficient is used as clustering index of K-means clustering algorithm. Cluster number need to be given for K-means clustering algorithm. This paper proposes an effectiveness indicator to determine the number of the optimal clustering and gives the parameter calculating method to get a wind farm model represented by multi equivalent wind turbines. The simulation results show that the proposed method has high precision and the improvement of K-means clustering algorithm is effective.

**Key words:** wind farm; equivalent model; spatial correlation; clustering algorithm

### 0 引言

环境污染和能源短缺已经成为当代世界的难题,而风能作为一种清洁无污染的可再生能源,对其大规模利用将成为今后解决能源危机的一项重要途径。近年来,风力发电发展迅速,风电在电网中所占的比重不断提高,大型风电场也逐步成为风力发电的主流。一个大型风电场往往由成百上千台风电机组组成,在风电场仿真时,如果对每一台风电机组建立详细模型,势必造成整个风电场模型的阶数过于庞大<sup>[1-2]</sup>,加大仿真计算量,不利于风电场并网特性的分析<sup>[3]</sup>,因此有必要对大规模风电场建立

等值模型。

国内外学者已经对风电场等值进行了许多研究<sup>[4-5]</sup>,大型风电场占地面积广,风电机组数量多,受风速的尾流效应等因素的影响<sup>[6-7]</sup>,风电机组的运行点并不相同,所以有必要对风电机组进行分群等值,而等值的方法也各不相同;文[8]将风电场输入风速分解为基本风、渐变风、阵风和随机风,给出了恒速风机和变速风机以及风电场变压器的等值方法;在传统的基于风速的等值方法上,文[9]根据多个风速段下各机组风能利用系数与风速的分段函数关系,以风能利用系数为权重将风速的立方叠加取平均值得到等值风速;文[10]推导了风电场集电线路的等值方法和变压器的等值方法,提出了根据风电场差异性的分群方法;文[11]提出以故障切除

时风电机组的转速来进行分群,文[12]则提出了以风速和转速差异来进行机组分群的方法。文[13]基于DFIG三阶简化动力学模型,根据暂态内电势特性发生显著变化所对应的风速上下界来对DFIG进行分群,提出了基于戴维南电路的双馈风电场等值方法。为了提高风电场等值模型的精度,也有文献将优化算法应用于风电场等值模型的参数计算<sup>[14-16]</sup>。

风电场中风电机组在空间上并非完全独立,而是具有一定的相关性,即在空间上受到其他不同位置的风电机组以及所处空间的结构布局以及环境条件的影响。风电机组间的影响主要表现为尾流效应,环境条件则主要包括海拔高度和地面的粗糙度,特别是中国西部的风电基地大多坐落于山区,风电场中风电机组的高度差异较大,海拔高度对各个风电机组的风速的影响不容忽视。鉴于此笔者在考虑风电场中风电机组空间相关性的基础上,采用改进的聚类算法对风电机组进行分群,确定了最佳分群数,仿真结果验证了该方法的有效性。

## 1 机组间的空间相关性

风电场由大量的风电机组组成,由于尾流效应的影响,坐落在下风向的机组的风速往往低于坐落在上风向的风电机组的风速。Jensen模型<sup>[17]</sup>能够很好地描述平坦地形的尾流情况,假设尾流影响的半径呈线性,则可以用如图1所示的模型来描述。图1中: $x$ 为风电机组安装的位置坐标,上游机组安装在0处,下游机组安装在 $x$ 处; $v_0$ 为自然风速; $v(x)$ 为受尾流影响后的风速; $\alpha$ 为圆锥顶点因数; $\tan\alpha$ 的取值根据当地条件进行选取,当风电机组接收到的是自然风速时,取0.04;否则取0.08; $r_0$ 为风力机叶轮半径; $r(x)$ 为风力机在 $x$ 处的投影半径,可以得到下述关系

$$r(x) = r_0 + x \tan \alpha. \quad (1)$$

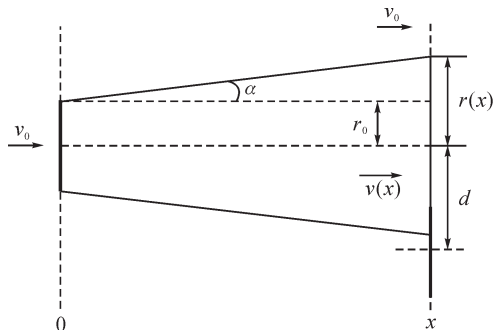


图1 尾流效应示意图

Fig. 1 Diagram of the wake effect

由Jensen模型可以得到距离上游风电机组下游 $x$ 处的风速为

$$v(x) = v_0(1 - d_f) = v_0 \{1 - (1 - \sqrt{1 - C_T}) [\frac{r_0}{r(x)}]^2\}. \quad (2)$$

式(2)中: $d_f$ 为平坦地形的风速下降系数; $C_T$ 为推力系数,一般取0.2。

由于风电场地形较复杂,不同安装地点的风电机组具有不同的海拔高度。同一地点不同海拔高度处的风速也有很大的变化,靠近地面的风速较小,越高则风速越大,并且如果地方的粗糙度大的话这种现象越发明显。风速与高度的变化关系可由式(3)表示

$$v(h) = v_0 (\frac{h}{h_0})^\alpha. \quad (3)$$

式(3)中: $v_0$ 和 $v(h)$ 分别为高度为 $h_0$ 和 $h$ 处的风速; $\alpha$ 为风速随高度变化的系数,一般取1/7。

由无损耗贝努利方程可得,复杂地形的风速下降系数 $d_c$ 为<sup>[18]</sup>

$$d_c = d_f [\frac{v_0}{v(h)}]^2. \quad (4)$$

由式(4)联立式(2)、(3)可得到

$$v(x, h) = v(h)(1 - d_c) = v_0 [1 - (1 - \sqrt{1 - C_T}) (\frac{h_0}{h})^{2\alpha} (\frac{r_0}{r})^2] (\frac{h}{h_0})^\alpha. \quad (5)$$

下游风电机组的风轮往往不会完全处于上游风电机组的尾流投影面内,而是产生部分重叠。部分重叠的情况见图2,图2中: $r(x)$ 为上游机组在 $x$ 处投影的半径; $h_i$ 为投影的圆心高度; $r_0$ 为 $x$ 处的机组的风轮半径; $h_j$ 为其圆心高度; $d$ 为两圆心之间的水平距离; $S$ 为重叠面积; $\theta$ 为重叠部分所对应的圆心角。

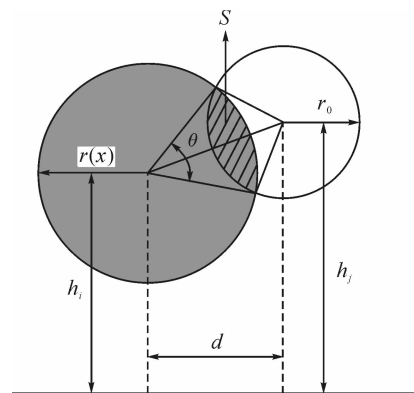


图2 重叠示意图

Fig. 2 Diagram of overlapping area

由余弦定理和几何关系可得到重叠部分的面积为

$$S = r(x)^2 \arccos [\frac{r(x)^2 + d^2 + (h_i - h_j)^2 - r_0^2}{2r(x)\sqrt{d^2 + (h_i - h_j)^2}}] +$$

$$r_0^2 \arccos \left[ \frac{r_0^2 + d^2 + (h_i - h_j)^2 - r(x)^2}{2r_0 \sqrt{d^2 + (h_i - h_j)^2}} \right] - r(x) \sqrt{d^2 + (h_i - h_j)^2} \\ \sin \left[ \arccos \left[ \frac{r(x)^2 + d^2 + (h_i - h_j)^2 - r_0^2}{2r(x) \sqrt{d^2 + (h_i - h_j)^2}} \right] \right] \quad (6)$$

风电场内任意一台处于下游处的风电机组都有可能受到上游多台风电机组的尾流效应的影响,因此下游风电机组的输入风速必定要考虑上游多台风电机组的综合影响。根据动量守恒定律得出下游风电机组的风速为

$$v_j(x_{k-j}) = \sqrt{v_{j0}^2(x_{k-j}) + \sum_{k \in N} \frac{S_{k-j}}{\pi r_j^2} [v_{k-j}^2(x_{k-j}) - v_{j0}^2(x_{k-j})]} \quad (7)$$

式(7)中: $v_{j0}$ 为没有考虑任何尾流效应时作用在第 $j$ 台风电机组上的风速; $N$ 为对第 $j$ 台机组有尾流效应影响的机组的集合; $S_{k-j}$ 为第 $k$ 台风电机组的投影在第 $j$ 台机组上的重叠面积; $v_{k-j}$ 为考虑尾流效应时第 $k$ 台机组作用在第 $j$ 台机组上的风速。

当某一个风电机组停运时,此风电机组的输出功率为0,并且造成风电场尾流效应的改变,特别是当此风电机组为上游机组时,对下游机组来说相当于不存在,即不考虑尾流效应的影响。在此定义停运因子 $p_k$ ,当风电机组 $k$ 停运时 $p_k=0$ ;否则, $p_k=1$ 。则下游风电机组的风速为

$$v_j(x_{k-j}) = \sqrt{v_{j0}^2(x_{k-j}) + \sum_{k \in N} p_k \frac{S_{k-j}}{\pi r_j^2} [v_{k-j}^2(x_{k-j}) - v_{j0}^2(x_{k-j})]} \quad (8)$$

令系数 $a_j = \frac{v_j(x_{k-j})}{v_{j0}(x_{k-j})}$ 来表征风电机组之间的相关性,则得到

$$a_j = \sqrt{1 + \sum_{k \in N} p_k \frac{S_{k-j}}{\pi r_j^2} [b_{k-j}^2 - 1]} \quad (9)$$

式(9)中: $b_{k-j} = \left\{ 1 - (1 - \sqrt{1 - C_T}) \left( \frac{h_k}{h_j} \right)^{2\alpha} \left[ \frac{r_j}{r_j(x=k)} \right]^2 \right\} \left( \frac{h_j}{h_k} \right)^\alpha$ ,其中, $h_k, h_j$ 分别为第 $k$ 和第 $j$ 台风电机组的海拔高度; $r_j$ 为第 $j$ 台风电机组的风轮半径, $r_j(x=k)$ 为第 $k$ 台风电机组在第 $j$ 台处的尾流效应投影半径。

## 2 风电机组分群方法

K-means 聚类算法是一种典型的基于距离的聚类算法,它将每个聚类的均值作为群的中心,不断计算数据对象与群中心之间的距离来对数据进行群的划分。原始的 K-means 聚类方法需要事先给出聚类的个数,这样具有一定的盲目性,聚类数的大小对最终聚类的结果具有较大的影响。为了确定最佳分群数,文中提出了如下有效性指标

$$w(n) = \frac{D_{\min}}{\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n d(k)_{\max}} \quad (10)$$

式(10)中: $D_{\min}$ 为聚类中心之间的距离的最小值; $d(k)_{\max}$ 为第 $k$ 群中到聚类中心距离最大点的距离; $n$ 为聚类的群的个数。聚类要求群与群之间应该有一定的距离,同一群中的数据之间应该有较小的距离,此有效性指标 $w(n)$ 的值越大说明聚类效果越好。

对于给定风向、机组位置和机组停运情况下可以得出风电机组间的空间相关性,进而计算出相应的风电机组之间的相关性系数 $a_j$ ,然后利用改进的 K-means 算法以系数 $a_j$ 对风电机组进行分群,计算流程见图3。

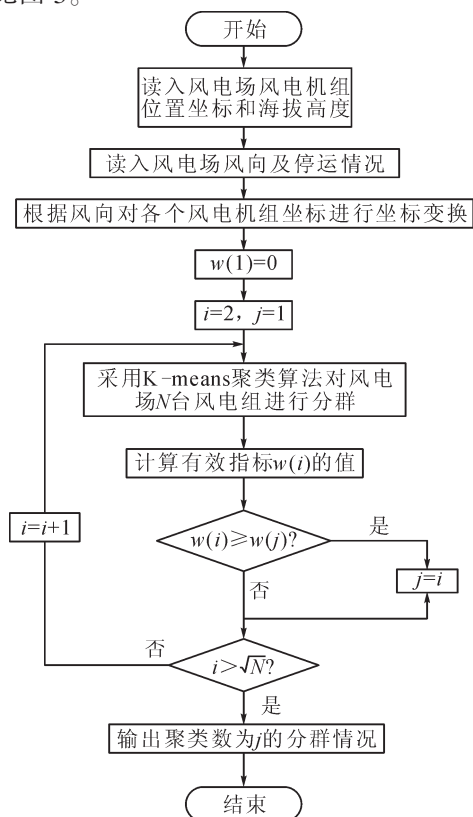


图3 风电机组分群方法流程图

Fig. 3 Flow chart of the clustering approach for wind turbines

在工程实际中,可按照类似气象部门风向玫瑰图上风向方位的处理方式,将 $0^\circ \sim 360^\circ$ 划分为16个风向区,每个风向区的跨度为 $22.5^\circ$ 。每个风向对应着一组相关性系数,即对应着一种分群方式。如果已知风向的变化序列,则可以通过调用相应的分群结果来对风电场进行等值建模。

## 3 风电场等值参数计算

### 3.1 风电机组参数计算

设风电场由 $N$ 台相同型号的双馈风电机组组

成,按照改进的 K-means 聚类算法将风电机组分成  $K$  个群,每个群分别等值成一台风电机组。等值风电机组各部分参数的计算方法如下。

1) 发电机参数。

$$\begin{cases} S_{\text{eq}} = mS, P_{\text{eq}} = \sum_{i=1}^m P_i, x_{s,\text{eq}} = \frac{x_s}{m} \\ x_{r,\text{eq}} = \frac{x_r}{m}, x_{m,\text{eq}} = \frac{x_m}{m}, r_{s,\text{eq}} = \frac{r_s}{m}, r_{r,\text{eq}} = \frac{r_r}{m} \end{cases} \quad (11)$$

式(11)中:  $m$  为同一群中风电机组的台数;下标 eq 表示等值后的参数;  $S$  表示单台风电机组的容量;  $P$  表示单台风电机组的有功功率;  $x_s$  和  $r_s$  分别为定子电抗和定子电阻;  $x_m$  为励磁电抗;  $x_r$  和  $r_r$  分别为转子电抗和转子电阻。

2) 轴系参数。

$$\begin{cases} T_{g,\text{eq}} = mT_g, T_{l,\text{eq}} = mT_l \\ K_{s,\text{eq}} = mK_s, D_{s,\text{eq}} = mD_s \end{cases} \quad (12)$$

式(12)中:  $T_g$  为发电机转子惯性时间常数;  $T_l$  为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) 控制器等值参数。桨距角控制模块的参数不变,功率控制模块的等效基准容量为

$$S_{\text{ref,eq}} = mS_0 \quad (13)$$

有功功率控制参考值为

$$P_{\text{ref,eq}} = \sum_{i=1}^m P_{\text{ref},i} \quad (14)$$

### 3.2 变压器参数计算

风电场的变压器主要分为与风电机组相连的机端变压器和处于整个风电场出口处的主变压器,主变压器往往只有一台,并不需要等值。机端变压器的等值参数为

$$\begin{cases} S_{T,\text{eq}} = mS_T \\ x_{T,\text{eq}} = \frac{x_T}{m} \end{cases} \quad (15)$$

式(15)中:  $S_T$  是机端变压器容量;  $x_T$  是变压器电抗。

### 3.3 集电线路参数计算

风电场内集电线路可分解为干线式和放射式两种连接方式,各机组的出力各不相同,因此线路的等值阻抗并不能简单地串并联的叠加。无论是干线式还是放射式结构,均可以根据等值前各机组出口与公共连接点电压差的加权平均值与等值后机组出口与公共连接点电压差相等的原则来进行等值,而权重为风电机组的输出功率。

干线式结构见图 4, 这条干线上共有  $n$  台风电机组,由其中的 1 到  $m$  号机组等值成了等值风电

组,由电压差相等的原则得到干线式集电线路的等值阻抗<sup>[11]</sup>为

$$Z_{\text{eq1}} = \frac{\sum_{i=1}^m [\sum_{k=1}^i (Z_k \sum_{j=k}^n P_j) P_i]}{(\sum_{i=1}^m P_i)^2} \quad (16)$$

式(16)中:  $Z_i$  为第  $i$  段集电线路的阻抗;  $P_i$  为第  $i$  台风电机组的输出功率。

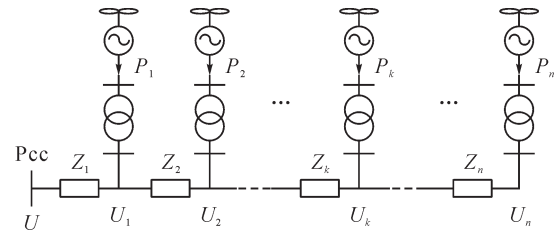


图 4 集电线路干线式结构

Fig. 4 Structural diagram connected in series

放射式结构见图 5, 同理可得到放射式集电线路的等值阻抗<sup>[19]</sup>为

$$Z_{\text{eq2}} = \frac{\sum_{i=1}^m Z_i P_i^2}{(\sum_{i=1}^m P_i)^2} \quad (17)$$

式(17)中:  $Z_i$  为第  $i$  段集电线路的阻抗;  $P_i$  为第  $i$  台风电机组的输出功率。

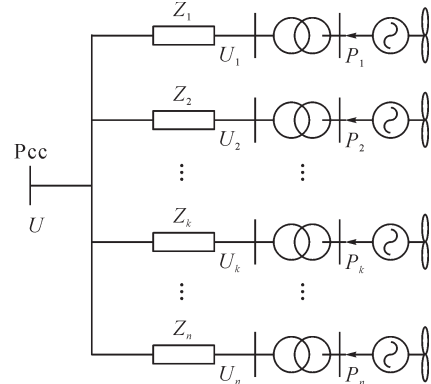


图 5 集电线路放射式结构

Fig. 5 Structural diagram connected in parallel

### 3.4 等值风速计算

风电场各风电机组的风速由式(6)和式(8)计算得出,等值风电机组的输入风速则是由此群的所有风电机组的平均风速确定

$$v_{\text{eq}} = \frac{\sum_{k=1}^m v_k}{m} \quad (18)$$

式(18)中,  $m$  为聚到此群的风电机组台数。

### 3.5 误差分析

为了评价等值效果的准确性,采用如下的有功

和无功平均偏差作为等值模型的评价标准。有功功率和无功功率的平均偏差的计算公式为

$$\begin{cases} E_P = \frac{\int_{t_1}^{t_2} |P_{eq} - P| dt}{\int_{t_1}^{t_2} |P| dt} \\ E_Q = \frac{\int_{t_1}^{t_2} |Q_{eq} - Q| dt}{\int_{t_1}^{t_2} |Q| dt} \end{cases} \quad (19)$$

式(19)中:  $P$ 、 $Q$  分别为风电场详细模型在出口处的有功功率和无功功率;  $P_{eq}$  和  $Q_{eq}$  分别为等值模型在风电场出口处的有功功率和无功功率;  $t_1$  和  $t_2$  分别为误差分析的起始和终止时间。

#### 4 算例分析

在 MATLAB/Simulink 中搭建了如图 6 所示的双馈风电场模型, 风电场由  $4 \times 4$  共 16 台风电机组组成, 风电机组的编号由  $WT_1$  至  $WT_{16}$ , 单机容量为 1.5 MW, 单台风电机组通过机端变压器(690 V/35 kV)和集电线路连接到公共连接点 Pcc 上, 再通过风电场主变压器(35 kV/110 kV)和线路连接到电网。风电场中相邻的排和列的风电机组之间的距离均为 500 m, 风轮半径为 40 m,  $\tan\alpha$  取 0.04, 推力系数  $C_T$  取 0.2,  $WT_7$  风电机组停运。风电场的风速由风电场中测风塔 70 m 处的风速得到<sup>[20]</sup>, 设此风速为 10.5 m/s, 风向为  $45^\circ$ , 各风电机组的海拔高度见表 1。

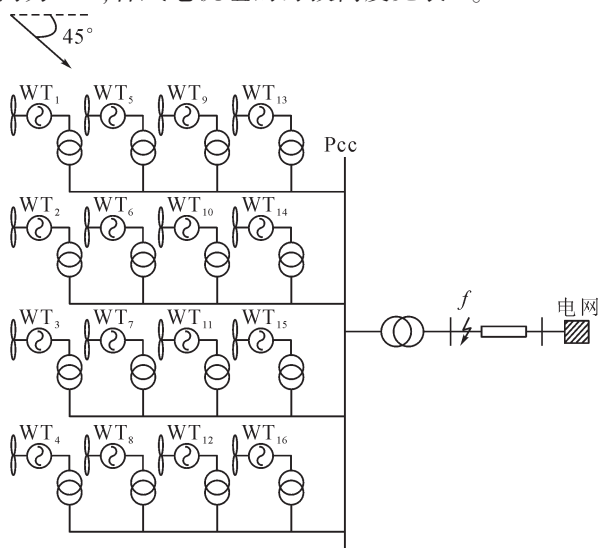


图 6 风电场系统示意图

Fig. 6 Diagram of wind farm

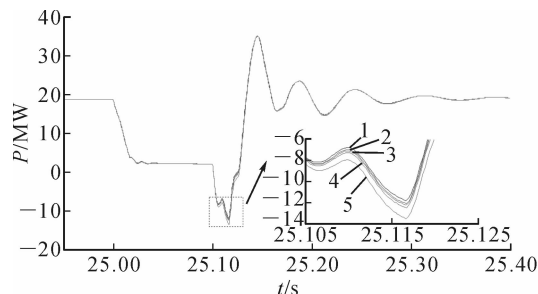
根据文中所提的方法对整个风电机组 (除了停运的 7 号机组外) 进行分群, 分为 4 群。第 1 群: 1, 5, 9, 13, 14 号机组; 第 2 群: 2, 6, 10 号机组; 第 3 群: 3, 11, 15, 16 号机组; 第 4 群: 4, 8, 12 号机组。分群

表 1 风电机组海拔高度

Table 1 Altitude of the wind turbines

| 机组编号            | 海拔高度/m | 机组编号             | 海拔高度/m |
|-----------------|--------|------------------|--------|
| WT <sub>1</sub> | 109    | WT <sub>9</sub>  | 106    |
| WT <sub>2</sub> | 95     | WT <sub>10</sub> | 87     |
| WT <sub>3</sub> | 84     | WT <sub>11</sub> | 86     |
| WT <sub>4</sub> | 67     | WT <sub>12</sub> | 63     |
| WT <sub>5</sub> | 112    | WT <sub>13</sub> | 103    |
| WT <sub>6</sub> | 86     | WT <sub>14</sub> | 102    |
| WT <sub>7</sub> | 97     | WT <sub>15</sub> | 82     |
| WT <sub>8</sub> | 79     | WT <sub>16</sub> | 93     |

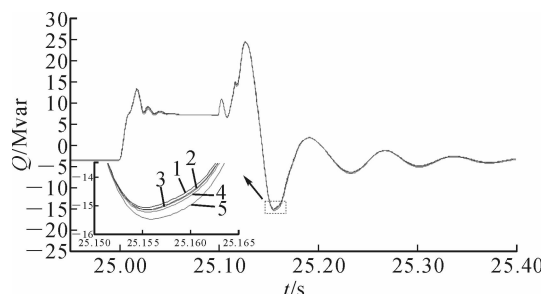
后在每一群内计算出相应的等值参数, 并搭建相应模型进行仿真。25 s 时刻在如图 6 所示的位置发生三相短路故障, 0.1 s 后故障切除, 将风电场出口处的有功功率和无功功率分别与详细模型以及和其他几种分群情况的对比见图 7、8。



1—详细模型; 2—四机等值模型; 3—两机等值模型; 4—三机等值模型; 5—单机等值模型。

图 7 风电场出口处的有功功率

Fig. 7 Active power of wind farm at point of interconnection



1—详细模型; 2—四机等值模型; 3—两机等值模型; 4—三机等值模型; 5—单机等值模型。

图 8 风电场出口处的无功功率

Fig. 8 Reactive power of wind farm at point of interconnection

文中所提分群等值方法与详细模型和其他分群情况的结果对比以及误差比较见表 2, 其中式(19)中的  $t_1$  和  $t_2$  分别取 25 s 和 26 s。

从图 7、8 以及表 2 可以看出, 等值模型与详细模型相比大大缩减了仿真的时间, 多机等值在等值效果上优于单机等值, 文中方法得出的四机等值的效果优于三机和两机等值, 等值的效果与有效性指

表2 模型结果对比

Table 2 Comparison of the results

| 模型类型 | $E_p/\%$ | $E_Q/\%$ | 有效性指标值  | 仿真时间/s |
|------|----------|----------|---------|--------|
| 详细模型 | 0.00     | 0.00     | —       | 615.09 |
| 四机等值 | 0.43     | 1.61     | 3.227 7 | 131.07 |
| 三机等值 | 0.96     | 3.01     | 1.585 8 | 90.50  |
| 两机等值 | 0.63     | 2.00     | 2.918 9 | 51.69  |
| 单机等值 | 2.42     | 6.98     | —       | 32.06  |

标的值具有一致性,从而也验证了文中所提风电机组等值有效性指标的有效性。

## 5 结论

1)在综合考虑风电场中机组间空间相关性的基础上,以空间相关性系数为分群指标提出了风电场等值模型。所提出的模型大大缩短了仿真时间,在精度上优于单机等值模型。

2)针对传统的K-means聚类算法需要事先给出聚类个数的问题,提出了有效性指标来确定分群的个数,仿真验证了所提有效性指标能够确定最优分群数,具有一定的有效性。

3)文中所提的分群方法可事先根据气象部门处理风向玫瑰图的方法按照不同的风向对风电机组进行分群,使用时可根据实际的风向数据直接调用相应的等值模型进行仿真建模分析,具有一定的工程应用价值。

## 参考文献:

- [1] 赵艳军,曾 沅. 基于双馈式风电机组的风电场实用动态等值模型研究[J]. 广东电力,2012,25(4):53-58.  
ZHAO Yanjun,ZENG Yuan. Research on applied dynamic equivalence model for wind farm based on double-fed wind power generating units[J]. Guangdong Electric Power,2012,25(4):53-58.
- [2] 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.
- [3] 王天施,苑 舜. 风力发电对电网的影响及对策[J]. 高压电器,2010,46(8):89-92.  
WANG Tianshi,YUAN Shun. Effects of wind power generation on power grid with countermeasures[J]. High Voltage Apparatus,2010,46(8):89-92.
- [4] 曹张洁,向 荣,谭 谨,等. 大规模并网型风电场等值建模研究现状[J]. 电网与清洁能源,2011,27(2):56-60.  
CAO Zhangjie,XIANG Rong,TAN Jin,et al. Review of

current research on equivalent modeling of large-scale grid-connected wind farm[J]. Advances of Power System & Hydroelectric Engineering,2011,27(2):56-60.

- [5] 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.
- [6] 陈树勇,戴慧珠,白晓民,等. 尾流效应对风电场输出功率的影响[J]. 中国电力,1998,31(11):28-31.  
CHEN Shuyong,DAI Huizhu,BAI Xiaomin,et al. Impact of wind turbine wake on wind power output[J]. Electric Power,1998,31(11):28-31.
- [7] 苏勋文,赵振兵,陈盈今,等. 尾流效应和时滞对风电场输出特性的影响[J]. 电测与仪表,2010,47(3):28-31.  
SU Xunwen,ZHAO Zhenbing,CHEN Yingjin,et al. Impacts of wake effect and time delay on output characteristics of wind farm[J]. Electrical Measurement & Instrumentation,2010,47(3):28-31.
- [8] SLOOTWEG J G,KLING W L. Aggregated modelling of wind parks in power system dynamics simulations[C]//2003 IEEE Bologna Power Tech Conference Proceedings. Bologna:IEEE,2003:1-6.
- [9] 李洪美,万秋兰,向昌明. 考虑风速的风电场等值方法[J]. 电力自动化设备,2013,33(1):121-123.  
LI Hongmei,WAN Qiulan,XIANG Changming. Wind farm equivalence method considering wind speed[J]. Electric Power Automation Equipment,2013,33(1):121-123.
- [10] MULJADI E,PASUPULATI S,ELLIS A,et al. Method of equivalencing for a large wind power plant with multiple turbine representation[C]//2008 IEEE Power and Energy Society General Meeting Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century.[S.l.]:IEEE,2008:528-536.
- [11] 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 Zengqiang,SU Xunwen,YANG Qixun,et al. Multi-machine representation method for dynamic equivalent model of wind farms[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2010,25(5):162-169.
- [12] 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.
- [13] 周海强,张明山,薛禹胜,等. 基于戴维南电路的双馈风电场动态等值方法[J]. 电力系统自动化,2012,36(23):42-47.  
ZHOU Haiqiang,ZHANG Mingshan,XUE Yusheng,et al.

- A dynamic equivalent method for doubly-fed induction generator wind farm based on the thevenin equivalent circuit[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(23):42-47.
- [14] 栗然, 唐凡, 刘英培, 等. 基于自适应变异粒子群算法的双馈风电机组等值建模[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(4):22-27.
- LI Ran, TANG Fan, LIU Yingpei, et al. Equivalent model of doubly-fed wind turbine generator systems based on auto mutation particle swarm optimization algorithm[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(4):22-27.
- [15] 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.
- LI Hui, WANG Hesheng, SHI Xuyang, 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] 马幼捷, 杨海珊, 周雪松, 等. 基于人工神经网络的风电场建模[J]. 中国电力, 2010, 43(9):79-82.
- MA Youjie, YANG Haishan, ZHOU Xuesong, et al. Modeling of wind farms based on artificial neural networks[J]. Electric Power, 2010, 43(9):79-82.
- [17] GONZÁLEZ-LONGATT F, WALL P, TERZIJA V. Wake effect in wind farm performance: Steady-state and dynamic behavior[J]. Renewable Energy, 2012, 39(1):329-338.
- [18] 郑睿敏, 李建华, 李作红, 等. 考虑尾流效应的风电场建模以及随机潮流计算[J]. 西安交通大学学报, 2008, 42(12):1515-1520.
- ZHENG Ruimin, LI Jianhua, LI Zuohong, et al. Modeling of large-scale wind farms in the probabilistic power flow analysis considering wake effects[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2008, 42(12):1515-1520.
- [19] 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.
- [20] 王红芳, 刘玮, 郑庆尧, 等. 风电场风能资源评估几个关键问题分析[J]. 西北水电, 2011(z1):76-78.
- WANG Hongfang, LIU Wei, ZHENG Qingyao, et al. Analysis of key issues about wind energy resource assessment for wind farm[J]. Northwest Water Power, 2011(z1):76-78.
- 刘畅(1991—), 男, 硕士研究生, 研究方向为风电场等值、负荷预测。
- 刘天琪(1962—), 女, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电力系统分析计算与稳定控制、调度自动化、高压直流输电、智能电网。
- 何川(1988—), 男, 博士研究生, 研究方向为电能质量、新能源并网、负荷预测。

(上接第 140 页)

- LI Dongyan, RONG Mingzhe, ZHANG Meng, et al. Effect of isolating switch operation on very fast transient over-voltage in extra-high voltage GIS[J]. High Voltage Apparatus, 2009, 45(4):55-58.
- [17] 王森, 牛博, 薛军, 等. 官亭 750 kV GIS 隔离开关操作时的特快速暂态过电压实测研究[J]. 高压电器, 2012, 48(1):35-40.
- WANG Sen, NIU Bo, XUE Jun, et al. Study on 750 kV GIS VFTO measurement technology[J]. High Voltage Apparatus, 2012, 48(1):35-40.
- [18] 林莘, 李爽, 徐建源, 等. 超高压 GIS 暂态壳体电压的仿真研究[J]. 高压电器, 2011, 47(3):12-17.
- LIN Xin, LI Shuang, XU Jianyuan, et al. Simulation of transient enclosure voltage in EHV GIS[J]. High Voltage Apparatus, 2011, 47(3):12-17.
- 魏磊(1980—), 男, 高级工程师, 主要从事电网规划。
- 马欢(1990—), 女, 硕士研究生, 主要研究电力系统过电压与绝缘配合。