

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.210101

# 基于数据驱动的双馈风电场经 VSC-HVDC 并网 次同步振荡影响因素分析

徐鑫裕<sup>1</sup>, 边晓燕<sup>1</sup>, 张 骞<sup>1</sup>, 常喜强<sup>2</sup>, 黄阮明<sup>3</sup>, 孙开宁<sup>2</sup>

(1. 上海电力大学电气工程学院, 上海 200090; 2. 新疆电力公司, 新疆 乌鲁木齐 830063;  
3. 国网上海市电力公司经济技术研究院, 上海 200233)

**摘要:** 双馈风电场经柔性直流(VSC-HVDC)并网的振荡数据中蕴含大量信息, 这些信息能够反映不确定因素对系统次同步振荡的影响。提出了基于数据驱动的方法分析风速和风电场出口电流波动的不确定因素组合对次同步振荡的影响。首先, 对系统振荡数据按风速进行分段, 运用基于 Nuttall 窗插值的 FFT 识别功率数据中与小信号分析结果相对应的次同步振荡分量并提取幅值。然后, 利用高斯混合模型(GMM)聚类算法对因素组合进行聚类, 通过三种内部有效性指标评价聚类效果。最后, 从次同步振荡分量幅值变化的角度分析了风速/电流波动簇对次同步振荡的影响。结果表明: 在振荡影响因素组合聚类方面, 所提 GMM 方法相比于 K-Means 具有更好的聚类效果。当风速/电流波动因素组合属于部分聚簇时, 会恶化系统次同步振荡。

**关键词:** 双馈风电场; 柔性直流输电; 次同步振荡; 高斯混合模型; Nuttall 窗

## Analysis of influencing factors of subsynchronous oscillation caused by a DFIG-based wind farm via the VSC-HVDC grid-connected system based on a data driven method

XU Xinyu<sup>1</sup>, BIAN Xiaoyan<sup>1</sup>, ZHANG Qian<sup>1</sup>, CHANG Xiqiang<sup>3</sup>, HUANG Ruanming<sup>2</sup>, SUN Kaining<sup>3</sup>

(1. College of Electrical Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China;  
2. Xinjiang Electric Power Company, Urumqi 830063, China; 3. State Grid Shanghai Electric Power Economic and Technology Research Institute, Shanghai 200233, China)

**Abstract:** The oscillation data of a DFIG-based wind farm via the VSC-HVDC grid-connected system contains a lot of information. These can illustrate the comprehensive effect of uncertain factors on Sub-Synchronous Oscillation (SSO). This paper proposes a data-driven method to analyze the influence of the combination of uncertain factors of wind speed and current fluctuation at the Point of Common Coupling (PCC) of the wind farm on SSO. First, the system oscillation data is processed in segments according to wind speed. FFT based on Nuttall window interpolation is applied to detect the SSO component in the power data corresponding to the results of small-signal analysis, and the amplitude is extracted. Then, a Gaussian Mixture Model (GMM) clustering algorithm is adopted to cluster the factor combination, and the clustering quality is evaluated by three internal validity indicators. Finally, the influence of wind speed/current fluctuation clustering on SSO is analyzed from the perspective of the amplitude change of the SSO component. The results show that in the aspect of factor combination clustering, the proposed GMM clustering method has a better clustering effect than K-Means. When the combination of wind speed/current fluctuation factors belongs to partial clustering, the SSO of the system will worsen.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 51977128).

**Key words:** DFIG-based wind farm; VSC-HVDC; sub-synchronous oscillation; Gaussian mixture model; Nuttall window

## 0 引言

截至 2019 年底, 全球海上风电累计装机容量达

到 29 GW, 新增装机容量 6.1 GW, 成为风电发展的重心, 其相关研究成为科技创新最活跃的领域<sup>[1-2]</sup>。双馈风电机组在技术成熟度、成本及可靠性上具备一定优势, 是国内海上风电的主流机型<sup>[3-4]</sup>。海上风电通常采用 VSC-HVDC 或长距离交流馈入电网, 其中 VSC-HVDC 因其输电距离远, 不发生换相失

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51977128); 上海市教育发展基金会和上海市教育委员会“曙光计划”(18SG50)

败等优点成为大规模远距离海上风电场并网的首选方案<sup>[5]</sup>。随着国内外多个柔直系统工程出现次同步振荡(Sub-Synchronous Oscillation, SSO)现象<sup>[6]</sup>, 双馈风电场经 VSC-HVDC 并网次同步振荡问题受到了关注。因此, 研究双馈风电场经 VSC-HVDC 并网次同步振荡特性具有实际工程意义。

目前对风电场经 VSC-HVDC 并网次同步振荡研究主要通过建模对次同步振荡产生机理、影响因素以及抑制措施展开。文献[7]建立了直驱风电场经柔直并网外送的完整动态模型, 采用特征值法计算系统存在次同步/超同步振荡模态, 并分析了风电场并网距离、强相关控制器参数对次同步/超同步振荡特性的影响。文献[8-9]建立了双馈风电场经柔直并网系统的等值阻抗模型, 采用阻抗分析法分析次同步振荡产生机理, 并引入控制器参数灵敏度指标, 分析各参数对系统虚拟阻抗的影响。文献[10-11]采用两质量块模型研究风机轴系扭振机理, 并基于复转矩系数法设计附加阻尼控制器以抑制风机轴系振荡。但是, 建模所考虑的因素有限, 并且运用模型分析的方法分析各种影响因素的共同作用也较为复杂。而系统振荡数据中蕴含着大量信息, 这些信息能够反映影响因素对系统次同步振荡的综合作用<sup>[12]</sup>。因此, 基于数据驱动的方法为分析系统次同步振荡提供了新的途径。

目前基于数据驱动来分析次同步振荡的研究主要体现在次同步振荡分量检测方面。常用的次同步振荡分量检测方法为 Prony 算法<sup>[13]</sup>以及快速傅里叶变换方法(Fast Fourier Transform, FFT)<sup>[14]</sup>。Prony 算法能够检测出信号中频率、幅值、相位和阻尼比等信息, 但是计算效率较低, 不及 FFT, 且受噪声和模型定阶影响较大<sup>[15]</sup>。FFT 方法简单快速且能够检测出信号中的频率和幅值信息, 但是存在频谱泄露及栅栏效应问题, 导致检测精度不高<sup>[16-17]</sup>。为了保持检测效率同时提高检测精度, 文献[18-20]运用基于 Nuttall 窗插值的方法来改善 FFT 检测过程中频谱泄露以及栅栏效应对精度的影响。所提方法能够快速检测出信号中次同步振荡分量的频率和幅值, 且检测精度较高。

基于数据驱动方法分析次同步振荡影响因素方面的研究较少, 文献[13]运用 K-Means 算法对运行数据中的风速/电压因素进行聚类, 同时采用 prony 算法提取输出功率中含有的相关振荡模态, 最后利用 Apriori 算法对风速/电压因素聚簇与振荡模态进行关联分析。该文所用的 K-Means 算法是以数据点到聚簇中心的距离为标准对数据进行“硬划分”, 簇内数据呈现圆形分布, 其聚簇形状灵活性以

及数据属性之间相关性相比于高斯混合模型(Gaussian Mixture Model, GMM)聚类表现较弱<sup>[21-22]</sup>, 目前高斯混合模型聚类算法主要应用于图像识别<sup>[23-24]</sup>, 还未应用于影响因素聚类方面。因此, 有必要针对振荡数据采用效率较高的算法进行检测, 同时提出聚类效果更佳的 GMM 算法对振荡的影响因素进行聚类分析。

本文提出基于数据驱动的方法分析风速和风电场出口处电流波动的因素组合对双馈风电场经 VSC-HVDC 并网系统次同步振荡的影响。在次同步振荡分量检测方面, 采用了基于 Nuttall 窗插值的快速傅里叶变换算法, 以提高整体检测效率, 同时改善快速傅里叶变换的精度。在影响因素聚类方面, 提出基于高斯混合模型的风速/电流波动因素组合的聚类算法, 并通过三种内部有效性指标对 GMM 聚类和 K-Means 进行聚类质量评价与对比。由于振荡幅值可以作为电网稳控装置动作依据, 因此, 本文从次同步振荡分量幅值变化的角度来分析风速/电流聚簇对系统次同步振荡的影响。

## 1 系统次同步振荡模态研究

### 1.1 基于模型的次同步振荡模态研究

双馈风电场经 VSC-HVDC 并网系统结构如图 1 所示。风电场是由  $n$  台型号相同的 5 MW 双馈风机等值而成, 它们的参数和运行状态一致; VSC-HVDC 输电系统由风场侧换流站(Wind Farm Side VSC, WFVSC)、直流电缆和电网侧换流站(Grid Side VSC, GSVSC)构成; 交流电网由无穷大系统等效。

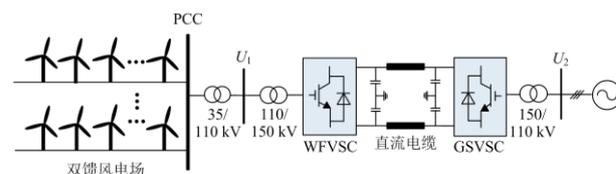


图 1 双馈风电场经 VSC-HVDC 并网系统结构示意图

Fig. 1 Structural diagram of DFIG-based wind farms via VSC-HVDC system

本文的双馈风机轴系模型采用常用的双质量块模型<sup>[25]</sup>, 将风轮、轮毂和齿轮箱等效为一质量块, 将发电机等效为另一质量块, 同时将齿轮箱微弱的转动柔性等效至中间传动轴来进行研究。风机转子侧变流器(Rotor Side Converter, RSC)采用定子磁链定向的矢量控制<sup>[26]</sup>, 以实现定子输出的有功功率跟踪参考值并维持机端电压稳定。网侧变流器(Grid Side Converter, GSC)采用电网电压定向的矢量控制, 以保持直流母线电压稳定<sup>[27]</sup>。转子侧变流器和

网侧变流器的控制框图参见文献[28]。VSC-HVDC系统中风场侧换流站采用  $P$ - $f$  控制和  $V$ - $Q$  控制, 以保持风电场交流侧电压和频率的稳定。电网侧换流站采用定直流电压控制和定无功功率控制, 以稳定直流电压并控制输出无功功率跟踪参考值<sup>[29]</sup>。风场侧换流站和电网侧换流站的控制框图参见文献[28]。所建双馈风电机组及 VSC-HVDC 模型能够反映其控制特性。

对上述系统建立小信号模型, 通过特征值分析得到系统的次同步振荡模态情况, 如表 1 所示。

表 1 次同步振荡模态分析

振荡模式	特征值	频率/Hz	阻尼比/%
$\lambda_{1,2}$	$-2.36 \pm j88.57$	14.10	0.03
$\lambda_{3,4}$	$-1.80 \pm j34.23$	5.45	0.05

由表 1 可知, 上述系统存在两种次同步振荡模态, 振荡频率分别为 14.10 Hz 和 5.45 Hz, 阻尼比皆小于 0.1, 不满足稳定运行要求。因此, 两者皆为不稳定的次同步振荡模态。

通过参与因子分析可得两种次同步振荡模态对应的强相关参与因子如表 2 所示。

表 2 次同步振荡模态参与因子

模式	强相关参与因子			
	$\Delta\omega_t$	$\Delta x_1$	$\Delta x_2$	$\Delta Q_w$
1	0.13 $\angle$	0.37 $\angle$	0.78 $\angle$	0.21 $\angle$
	166.4°	105.7°	31.4°	-62.7°
2	0.89 $\angle$	0.09 $\angle$	0.60 $\angle$	0.04 $\angle$
	10.2°	62.4°	-93.6°	163.4°

由表 2 可知, 模式 1 与  $\Delta x_1$ 、 $\Delta x_2$  和  $\Delta Q_w$  强相关; 模式 2 与  $\Delta\omega_t$  和  $\Delta x_2$  强相关。其中,  $\Delta x_1$ 、 $\Delta x_2$  为 RSC 状态变量增量,  $\Delta\omega_t$  为风轮转速增量,  $\Delta Q_w$  为 VSC-HVDC 风场侧无功功率增量。

## 1.2 基于数据的次同步振荡分量研究

在实际电网中, 将次同步振荡分量幅值作为稳控装置的动作依据<sup>[20]</sup>, 因此需要从振荡数据中获取相应次同步振荡分量的幅值。本节基于数据驱动方法对系统振荡数据进行处理和检测, 检测功率振荡数据中的次同步振荡分量, 并依据上节小信号分析结果筛选相应的振荡频率分量, 提取该分量的幅值。

### 1.2.1 数据来源与处理

本文的振荡数据是基于上述模型仿真获取。由于系统存在的两个次同步振荡模态阻尼比均小于 1, 因此发生次同步振荡的风险较高。本文针对不同初始风速进行多次仿真, 在 1.25 s 时母线  $U_2$  上发生

三相短路故障, 持续 0.25 s 后故障清除, 系统出现有功功率振荡, 一段时间后切换运行工况即改变风速值。以初始风速为条件风速, 一段时间后改变的风速值为预测风速<sup>[30]</sup>, 选择实测风速数据中与条件风速相等的所有风速, 取这些点下一时刻的风速数据构成预测风速集, 对此初始风速(条件风速)的每一种预测风速都进行仿真以获得大量系统振荡数据, 部分振荡波形如图 2 所示。系统振荡数据包括风速值, 风电场汇流母线处的三相电流值, 以及风电场输出功率值。

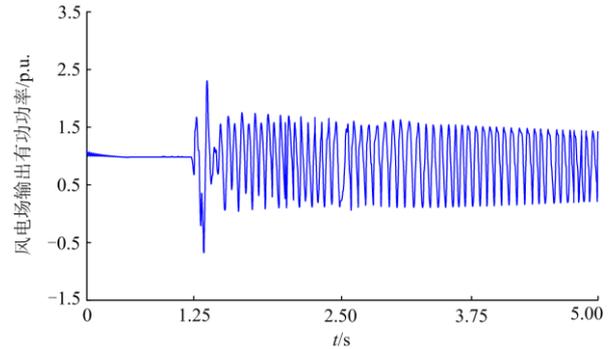


图 2 固定风速下系统故障时风电场输出有功功率动态响应

Fig. 2 Dynamic response of the DFIG active power when system failure occurs at fixed wind speed

数据处理如下:

1) 按风速进行分段。依据仿真时序读取系统运行数据并存入数据段, 数据段内风速变化不超过 0.05 m/s, 否则将数据存入新数据段中, 循环至所有数据均被存储至相应数据段中。

2) 每个数据段由一个风速值和电流波动值表示。风速值取数据段内平均风速, 电流波动值取数据段内三相电流波动的平均值。

3) 数据段内相应次同步振荡分量幅值提取。基于小信号模型分析所得系统存在的次同步振荡模态, 通过振荡频率 14.1 Hz 和 5.45 Hz 筛选数据分析结果, 提取数据段中相应的次同步振荡分量幅值信息。

### 1.2.2 基于 Nuttall 窗插值 FFT 的次同步振荡分量检测

FFT 算法是检测电网线路中次同步振荡分量的基本方法, 它将信号从时域转至频域以分析模态参数信息<sup>[20]</sup>。为减小检测过程中出现的栅栏效应及频谱泄露, 本文采用基于 Nuttall 窗插值 FFT 算法分析固定风速下的次同步振荡分量。

Nuttall 窗的表达式为

$$w_N(n) = \sum_{i=0}^3 (-1)^i a_i \cos\left(\frac{2\pi n}{N} \cdot i\right) \quad (1)$$

式中:  $n=0,1,\dots,N-1$ ;  $a_0=0.3125$ ,  $a_1=0.46875$ ,  
 $a_2=0.1875$ ,  $a_3=0.03125$ 。

根据式(1)求出 Nuttall 窗值, 将 FFT 个数据点分别乘上对应的 Nuttall 窗值后进行离散傅里叶变换, 然后用四谱线插值算法<sup>[19]</sup>计算得到次同步振荡分量的参数信息, 包括幅值、频率等。

## 2 基于高斯混合模型的影响因素聚类分析

双馈风电场经 VSC-HVDC 并网系统实际运行中受到不确定性因素(包括风速、电流波动等)影响, 其中风速与并网系统次同步振荡密切相关<sup>[31]</sup>, 而电流波动能够反映系统运行时受到的扰动, 如系统故障、负荷切除等, 这些扰动会影响双馈风机与柔直系统之间的相互作用<sup>[3,8]</sup>。两者共同作用会加剧系统次同步振荡。有必要通过高斯混合模型聚类得到风速/电流波动聚簇特征, 从而有助于量化分析风速/电流波动的因素组合对次同步振荡的影响。

### 2.1 高斯混合模型聚类

#### 2.1.1 高斯混合模型

高斯混合模型是由多个高斯分布函数的线性组合, 用于描述数据分布, 理论上高斯混合模型可以拟合出任意类型的分布<sup>[32]</sup>。

多维高斯分布概率密度函数为

$$p(x|\mu, \sigma) = \frac{1}{(2\pi)^{\frac{n}{2}} |\sigma|^{\frac{1}{2}}} \cdot e^{-\frac{1}{2}(x-\mu)^T \sigma^{-1}(x-\mu)} \quad (2)$$

式中:  $x$  为服从高斯分布的  $n$  维变量;  $\mu$  为  $n$  维均值向量;  $\sigma$  为  $n \times n$  协方差矩阵。

高斯混合模型的概率密度函数为

$$p_M(x) = \sum_{i=1}^k \omega_i \times p(x|\mu_i, \sigma_i) \quad (3)$$

式中,  $\omega_i \geq 0$  为混合成分的权重, 满足  $\sum_{i=1}^k \omega_i = 1$ 。

将多维变量组成的数据集分为  $k$  个服从高斯分布的聚簇, 其本质是确定高斯混合模型的参数  $\theta = (\mu, \sigma, \omega)$ 。

#### 2.1.2 参数估计

对于不完全数据通常采用期望最大化算法 (Expectation-Maximization Algorithm, EM) 进行参数估计。EM 算法是一种迭代优化算法, 每一次迭代分为两步, 分别为 E-step 以及 M-step。

假设数据集  $X = \{x_1, x_2, \dots, x_m\}$  服从高斯混合分布, 最大似然函数为  $\sum_{j=1}^m \ln \left\{ \sum_{i=1}^k \omega_i p(x_j|\mu_i, \sigma_i) \right\}$ 。

E-step: 计算  $x_j \in X, j = \{1, 2, \dots, m\}$  由第  $i$  个高斯模型生成的后验概率为

$$\gamma_{ji} = \frac{\omega_i \times p(x_j|\mu_i, \sigma_i)}{\sum_{l=1}^k \omega_l \times p(x_j|\mu_l, \sigma_l)} \quad (4)$$

M-step: 优化估计高斯混合模型参数为

$$\begin{cases} \mu_i = \sum_{j=1}^m \gamma_{ji} x_j / \sum_{j=1}^m \gamma_{ji} \\ \Sigma_i = \sum_{j=1}^m \gamma_{ji} (x_j - \mu_i)(x_j - \mu_i)^T / \sum_{j=1}^m \gamma_{ji} \\ \omega_i = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \gamma_{ji} \end{cases} \quad (5)$$

E-step 和 M-step 循环迭代, 直至似然函数值收敛, 得到高斯混合模型参数  $\theta = (\mu, \sigma, \omega)$ 。每个数据点  $x_j$  的聚簇标记  $\lambda_j$  如下确定:

$$\lambda_j = \arg \max_{i \in \{1, 2, \dots, k\}} p_M(z_j = i | x_j) \quad (6)$$

#### 2.1.3 聚类质量指标

一般来说, 评估聚类质量有两种标准, 内部评价指标和外部评价指标。内部评价指标是利用数据集的属性特征(即簇内紧密度和簇间分离度)来评价聚类质量, 常用的指标有 CH(Calinski-Harabasz) 指标<sup>[33]</sup>、SC(Silhouette Coefficient)指标<sup>[34]</sup>以及 DB(Davies-Bouldin)<sup>[35]</sup>指标。外部评价指标是针对已知分类标签数据的评价, 不适用于本文。

CH 指标的表示式为

$$CH(K) = \frac{tr(B)/(K-1)}{tr(W)/(N-K)} \quad (7)$$

式中:  $tr(B)$  为簇间距离差矩阵的迹;  $tr(W)$  为簇内距离差矩阵的迹;  $N$  为类别数;  $K$  为当前类别。CH 指标值越大则聚类质量越高。

SC 指标的表达式为

$$s = \frac{b-a}{\max(a,b)} \quad (8)$$

式中:  $a$  为样本与簇内其他样本之间的平均距离;  $b$  为样本与最近聚簇的所有样本的平均距离。SC 指标取值范围为  $[-1, 1]$ , 其值越接近 1 则聚类质量越高。

DB 指标表达式为

$$DB = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \max \left( \frac{\text{avg}(C_i) + \text{avg}(C_j)}{d_{\text{cen}}(C_i, C_j)} \right) \quad (9)$$

式中:  $\text{avg}(C_i)$  为簇  $C_i$  内每对样本的平均距离;  $d_{\text{cen}}(C_i, C_j)$  为簇  $C_i$  中心点与簇  $C_j$  中心点的距离。

DB 值越小则聚类质量越高。

## 2.2 影响因素的聚类分析

通过数据处理, 取得 1052 个数据段, 对数据段中的风速值和电流波动值进行高斯混合模型聚类, 根据贝叶斯信息准则<sup>[22]</sup>确定最佳聚类数为 9,

得到如图 3 所示的聚类结果。

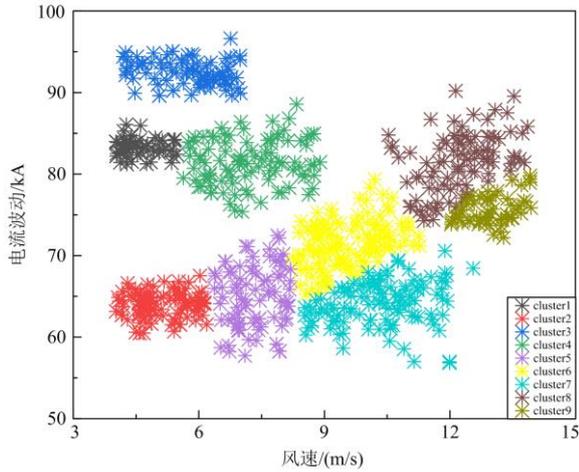


图 3 BIC 最佳聚簇数下的高斯混合模型聚类结果

Fig. 3 GMMs clustering result under the optimal  $k$  in BIC

由图 3 可知, 1 052 个数据点被分配为 9 个聚簇, 每个聚簇具有不同的风速/电流波动特征。聚簇 1 为图中黑色部分, 其风速范围为小于 5.5 m/s 且电流波动范围为 81.2~86.1 kA; 聚簇 2 为图中红色部分, 其风速范围为小于 6.2 m/s 且电流波动范围为 60.5~67.5 kA; 聚簇 3 为图中蓝色部分, 其风速范围为 4.2~7.0 m/s 且电流波动范围为大于 89.6 kA; 聚簇 4 为图中绿色部分, 其风速范围为 5.7~8.9 m/s 且电流波动范围为 75.4~88.6 kA; 聚簇 5 为图中紫色部分, 其风速范围为 6.4~8.2 m/s 且电流波动范围为 57.7~72.4 kA; 聚簇 6 为图中黄色部分, 其风速范围为 8.3~11.2 m/s 且电流波动范围为 65.2~79.4 kA; 聚簇 7 为图中青色部分, 其风速范围为 8.5~12.5 m/s 且电流波动范围为小于 70.5 kA; 聚簇 8 为图中酒红色部分, 其风速范围为大于 10.6 m/s 且电流波动范围为大于 74.3 kA; 聚簇 9 为图中浅绿色部分, 其风速范围为大于 12.0 m/s 且电流波动范围为小于 72.2 kA。

为验证本文方法对风速/电流影响因素组合聚类的效果, 将本文算法与 K-means 算法对风速/电流影响因素组合聚类进行聚类质量评价, 评价结果如表 3 所示。

表 3 K-Means 与 GMM 聚类效果比较

Table 3 Comparison of K-Means and GMM clustering effect

聚簇算法	样本数	CH	SC	DB
K-Means	1 052	1 160.3	0.344 9	1.304 4
GMM	1 052	2 208.4	0.625 5	0.741 1

由表 3 可知, 在样本数为 1 052 的情况下, 本文所用高斯混合模型聚类在 CH 指标、SC 系数、

DB 指标上均要优于 k-means 算法, 说明针对本文风速/电流影响因素组合聚类, 高斯混合模型聚类算法的聚类结果簇内紧密度更高且簇间分离度更大, 即同一聚簇数据相似性更好, 不同聚簇数据差异性更大。

### 3 风速/电流聚簇对次同步振荡分量的影响分析

结合 1.2 节运行数据中次同步振荡分量提取结果以及 2.2 节风速/电流波动因素组合聚类结果, 分别得到风速/电流波动聚簇与 5.45 Hz 振荡分量幅值的关系以及风速/电流波动聚簇与 14.1 Hz 振荡分量幅值的关系, 如图 4、图 5 所示。

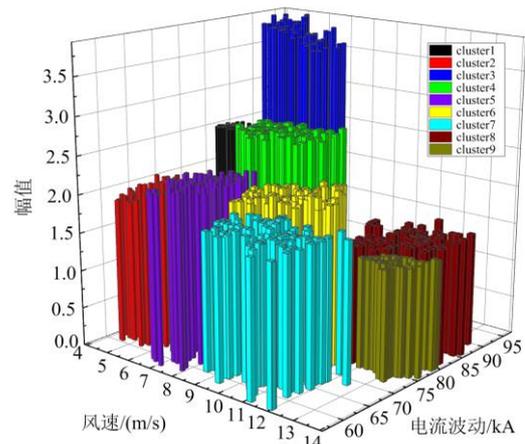


图 4 风速/电流波动聚簇与 5.45 Hz 振荡分量幅值的关系

Fig. 4 Relationship between wind speed/current fluctuation and the amplitude of 5.45 Hz oscillation component

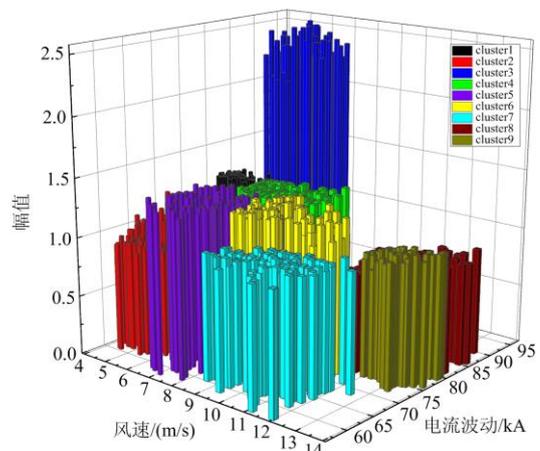


图 5 风速/电流波动聚簇与 14.1 Hz 振荡分量幅值的关系

Fig. 5 Relationship between wind speed/current fluctuation and the amplitude of 14.1 Hz oscillation component

由图 4 可知, 当风速/电流波动因素组合属于不同聚簇时, 对应 5.45 Hz 分量的幅值情况不同。聚簇 1 和聚簇 4 的簇内平均幅值接近, 分别为 2.475 和 2.593。聚簇 2、5、6 的簇内平均幅值接近, 分别为 1.981、2.135 和 2.093。聚簇 3 的簇内幅平均值较大为 3.700。聚簇 7、8、9 的簇内平均幅值较小, 分别为 1.831、1.521 和 1.423。上述数据说明当风速/电流波动的影响因素组合属于聚簇 1、3、4 时, 其对 5.45 Hz 分量的影响较大, 尤其当影响因素组合进入聚簇 3 范围, 该分量的幅值会急剧增大。当影响因素组合属于聚簇 2、5、6 时, 其对 5.45 Hz 分量的影响接近。当影响因素组合属于 7、8、9 时, 其对 5.45 Hz 分量的影响相对较小。

由图 5 可知, 当风速/电流波动因素组合属于不同聚簇时, 对应 14.1 Hz 分量的幅值情况不同。聚簇 1、4、6 的簇内平均幅值接近, 分别为 1.218、1.204 和 1.209。聚簇 2、7、9 的簇内平均幅值接近, 分别为 0.987、1.029 和 1.016。聚簇 3 和聚簇 5 的簇内平均幅值较大, 分别为 2.304 和 1.366。聚簇 8 的簇内平均幅值最小为 0.856。以上数据说明当风速/电流波动的影响因素组合属于聚簇 3 和聚簇 5 时, 其对 14.1 Hz 分量的影响较大, 尤其当影响因素组合进入聚簇 3 范围, 该分量的幅值会急剧增大。当影响因素组合属于聚簇 1、4、6 时, 其对 14.1 Hz 分量的影响相差不多。当影响因素组合属于聚簇 2、7、9 时, 其对 14.1 Hz 分量的影响也相差不多, 且相较于聚簇 1、4、6 的影响稍小。当影响因素组合属于聚簇 8 时, 其对 14.1 Hz 分量的影响最小。

由上述分析可知, 5.45 Hz 分量幅值高于 14.1 Hz 分量幅值, 在系统次同步振荡中占主导。当影响因素组合属于聚簇 3 时, 使两个振荡分量的幅值迅速增加, 恶化系统稳定性。

## 4 结论

本文提出基于数据驱动的方法分析了风速和风电场出口处电流波动的因素组合对双馈风电场经 VSC-HVDC 并网系统次同步振荡的影响, 得到的结论如下:

1) 次同步振荡分量检测方面, 基于 Nuttall 窗插值 FFT 的检测方法能够准确检测出振荡数据中的次同步振荡分量且计算效率高。

2) 在影响因素组合聚类方面, 所提出的 GMM 聚类方法用于影响因素聚类, 通过三个内部有效性指标的评估, 与 K-Means 相比, GMM 聚簇形状灵活, 更能达到内密外疏的效果, 簇内数据具有强相似性。

考虑到实际系统稳控装置的动作与振荡幅值密切相关, 所提针对振荡分量幅值的聚簇分析更具工程意义。

3) 在聚簇对系统次同步振荡的影响分析方面, 不同聚簇对系统次同步振荡的影响不同, 当影响因素进入低风速大电流波动时, 会恶化系统次同步振荡, 为风电场的稳定运行提供参考, 及时做出防控。

本文的后续工作将提出考虑多重影响因素的次同步振荡抑制措施。

## 参考文献

- [1] 窦如婷, 谢齐. 基于灰色预测模型的我国海上风电发展规模和趋势研究[J]. 海洋开发与管理, 2020, 37(10): 62-68.  
DOU Ruting, XIE Qi. The development scale and trend of china's offshore wind power based on grey forecasting model[J]. Ocean Development and Management, 2020, 37(10): 62-68.
- [2] 时智勇, 王彩霞, 李琼慧. “十四五”中国海上风电发展关键问题[J]. 中国电力, 2020, 53(7): 8-17.  
SHI Zhiyong, WANG Caixia, LI Qionghui. Key issues of China's offshore wind power development in the “14th five-year plan”[J]. Electric Power, 2020, 53(7): 8-17.
- [3] 边晓燕, 丁炆, 买坤, 等. 海上风电场经 VSC-HVDC 并网的次同步振荡与抑制[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(17): 25-39.  
BIAN Xiaoyan, DING Yang, MAI Kun, et al. Subsynchronous oscillation caused by grid-connection of offshore wind farm through VSC-HVDC and its mitigation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(17): 25-39.
- [4] 戴金水, 吕敬, 朱淼. 大型海上风电场经 VSC-HVDC 并网的次同步振荡阻尼特性分析[J]. 电气应用, 2016, 35(08): 51-56.  
DAI Jinshui, LÜ Jing, ZHU Miao. Analysis of subsynchronous oscillation damping characteristics of large-scale offshore wind farms connected to the grid via VSC-HVDC[J]. Electrotechnical Application, 2016, 35(8): 51-56.
- [5] KIRAKOSYAN A, MOURSI M S E, KHADKIKAR V. Fault ride through and grid support topology for the VSC-HVDC connected offshore wind farms[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2017, 32(3): 1592-1604.
- [6] 肖湘宁, 罗超, 廖坤玉. 新能源电力系统次同步振荡问题研究综述[J]. 电工技术学报, 2017, 32(6): 85-97.  
XIAO Xiangning, LUO Chao, LIAO Kunyu. Review of the research on subsynchronous oscillation issues in electric power system with renewable energy sources[J].

- Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(6): 85-97.
- [7] 陈宝平, 林涛, 陈汝斯, 等. 采用 VSC-HVDC 并网的直驱风电场次/超同步振荡特性[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(22): 44-59.  
CHEN Baoping, LIN Tao, CHEN Rusi, et al. Analysis on characteristics of sub/super-synchronous oscillation caused by grid-connected direct-drive wind farm via VSC-HVDC system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(22): 44-59.
- [8] 孙焜, 姚伟, 文劲宇. 双馈风电场经柔直并网系统次同步振荡机理及特性分析[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(22): 6520-6533.  
SUN Kun, YAO Wei, WEN Jinyu. Mechanism and characteristics analysis of subsynchronous oscillation caused by DFIG-based wind farm integrated into grid through VSC-HVDC system[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(22): 6520-6533.
- [9] 唐冰婕, 迟永宁, 田新首, 等. 基于阻抗频域灵敏度的双馈风电机组次同步振荡抑制措施[J]. 供用电, 2019, 36(10): 73-79.  
TANG Bingjie, CHI Yongning, TIAN Xinshou, et al. Sub-synchronous oscillation mitigation schemes of DFIG wind turbine based on impedance frequency-domain sensitivity[J]. Distribution & Utilization, 2019, 36(10): 73-79.
- [10] 陈实, 李宽, 李兴源, 等. 大规模海上风电场经 HVDC 并网引发轴系扭振分析与抑制[J]. 四川大学学报: 工程科学版, 2015, 47(6): 144-149.  
CHEN Shi, LI Kuan, LI Xingyuan. Analysis and damping of subsynchronous torsional interaction in large scale offshore wind farm supply power by HVDC[J]. Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition, 2015, 47(6): 144-149.
- [11] 赵鹏程, 王剑钊. 双馈风力发电机组轴系扭振特性研究[J]. 热力发电, 2020, 49(7): 35-40.  
ZHAO Pengcheng, WANG Jianzhao. Torsional vibration characteristics of double-feed wind turbine shafting[J]. Thermal Power Generation, 2020, 49(7): 35-40.
- [12] 钱忠敏, 贺兴, 葛晓军, 等. 基于相关性分析的电力系统数据驱动异常早期检测[J]. 供用电, 2019, 36(10): 30-35.  
QIAN Zhongmin, HE Xing, GE Xiaojun, et al. Data-driven early anomaly detection in power system based on correlation analysis[J]. Distribution & Utilization, 2019, 36(10): 30-35.
- [13] 苗洁蓉, 解大, 王西田, 等. 双馈风电机组振荡模式与影响因子的关联分析[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(17): 5049-5060, 5286.  
MIAO Jierong, XIE Da, WANG Xitian, et al. Correlation analysis between oscillation mode and impact factor of doubly-fed induction generator[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(17): 5049-5060, 5286.
- [14] 解大, 吴汪平, 苗洁蓉, 等. 双馈型风电机组谐波信息的大数据聚类分析[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(24): 7067-7076, 7421.  
XIE Da, WU Wangping, MIAO Jierong, et al. Big data clustering analysis for the harmonic data of the doubly fed induction generator[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(24): 7067-7076, 7421.
- [16] 袁明军, 江浩, 黎强, 等. 四统一四规范同步相量测量装置关键技术研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(4): 182-187.  
YUAN Mingjun, JIANG Hao, LI Qiang, et al. Research on key technology of four unified four standard phasor measurement unit[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(4): 182-187.
- [16] 黄星宇, 罗萍萍, 龚锦霞, 等. 新能源并网系统次同步谐波相量检测方法[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(13): 38-44.  
HUANG Xingyu, LUO Pingping, GONG Jinxia, et al. Subsynchronous harmonic phasor detection in a renewable energy grid-connected system[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(13): 38-44.
- [17] 杨京, 王彤, 唐俊刺. 基于滑窗 FFT 的次同步振荡时变幅频在线监测方法[J]. 中国电力, 2020, 53(11): 139-146.  
YANG Jing, WANG Tong, TANG Junci. Subsynchronous oscillation time-varying amplitude frequency on-line monitoring method based on sliding window FFT[J]. Electric Power, 2020, 53(11): 139-146.
- [18] 许珉, 杨阳, 陈飞, 等. 基于 Nuttall (I)窗的插值 FFT 算法[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(23): 44-48.  
XU Min, YANG Yang, CHEN Fei, et al. An interpolated FFT algorithm based on the Nuttall(I)window[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(23): 44-48.
- [19] 张俊敏, 刘开培, 汪立, 等. 基于四谱线插值 FFT 的谐波分析快速算法[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(1): 139-145.  
ZHANG Junmin, LIU Kaipei, WANG Li, et al. A rapid algorithm for harmonic analysis based on four-spectrum-line interpolation FFT[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(1): 139-145.
- [20] 张超, 王维庆, 王海云, 等. 风火打捆外送系统 220 kV 电网次同步振荡监控策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(11): 138-144.

- ZHANG Chao, WANG Weiqing, WANG Haiyun, et al. Study on monitoring and control strategy of subsynchronous oscillation for 220 kV power grid in wind-thermal-bundled transmission system[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(11): 138-144.
- [21] LI K, MA Z, ROBINSON D, et al. Identification of typical building daily electricity usage profiles using Gaussian mixture model-based clustering and hierarchical clustering[J]. Applied Energy, 2018, 231: 331-342.
- [22] 杨恒岳, 刘青荣, 阮应君. 基于 k-means 聚类算法的分布式能源系统典型日冷热负荷选取[J]. 热力发电, 2021, 50(3): 84-90.  
YANG Hengyue, LIU Qingrong, RUAN Yingjun. Selection of typical daily cooling and heating load of CCHP system based on k-means clustering algorithm[J]. Thermal Power Generation, 2021, 50(3): 84-90.
- [23] 叶珍, 白璘. 局部保护降维与高斯混合模型的高光谱图像分类[J]. 工业仪表与自动化装置, 2017(4): 3-6, 15.  
YE Zhen, BAI Lin. Hyperspectral image classification based on locality preserving dimension reduction and Gaussian mixture model[J]. Industrial Instrumentation & Automation, 2017(4): 3-6, 15.
- [24] 区峻, 石千惠. 特征降维和高斯混合模型的体育运动动作识别[J]. 现代电子技术, 2017, 40(11): 61-64.  
QU Jun, SHI Qianhui. Sports motion recognition based on feature dimensionality reduction and Gaussian mixture model[J]. Modern Electronics Technique, 2017, 40(11): 61-64.
- [25] AKHMATOV V. Variable-speed wind turbines with doubly-fed induction generators part I: modeling in dynamic simulation tools[J]. Wind Engineering, 2002, 26(2): 85-108.
- [26] BOUBZIZI S, ABID H, ELHAJJAJI A, et al. Comparative study of three types of controllers for DFIG in wind energy conversion system[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2018, 3(3): 214-225. DOI: 10.1186/s41601-018-0096-y.
- [27] 王毅, 朱晓荣, 赵书强. 风力发电系统的建模与仿真[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2015.
- [28] ZHOU Q, DING Y, MAI K, et al. Mitigation of subsynchronous oscillation in a VSC-HVDC connected offshore wind farm integrated to grid[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2019, 109: 29-37.
- [29] 汤广福. 基于电压源换流器的高压直流输电技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2009.
- [30] 马静, 高翔, 李益楠, 等. 考虑风速随机特征的多工况电力系统稳定性分析[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(8): 26-32.  
MA Jing, GAO Xiang, LI Yanan, et al. Stability analysis considering time-varying wind speed for power system with multiple operating conditions[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(8): 26-32.
- [31] SUN K, YAO W, FANG J, et al. Impedance modeling and stability analysis of grid-connected DFIG-based wind farm with a VSC-HVDC[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2020, 8(2): 1375-1390.
- [32] 李聪聪, 王彤, 相禹维, 等. 基于改进高斯混合模型的概率潮流解析方法[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(10): 146-155.  
LI Congcong, WANG Tong, XIANG Yuwei, et al. Analytical method based on improved Gaussian mixture model for probabilistic load flow[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(10): 146-155.
- [33] ŁUKASIK S, KOWALSKI P A, CHARYTANOWICZ M, et al. Clustering using flower pollination algorithm and Calinski-Harabasz index[C] // 2016 IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC), July 24-29, 2016, Vancouver, BC, Canada: 2724-2728.
- [34] 孙石磊, 王超, 赵元棣. 基于轮廓系数的参数无关空中交通轨迹聚类方法[J]. 计算机应用, 2019, 39(11): 3293-3297.  
SUN Shilei, WANG Chao, ZHAO Yuandi. Parameter independent clustering of air traffic trajectory based on silhouette coefficient[J]. Journal of Computer Applications, 2019, 39(11): 3293-3297.
- [35] KARO I M K, MAULANA A K, HUDA A F. A cluster validity for spatial clustering based on Daviesbouldin index and polygon dissimilarity function[C] // 2017 Second International Conference on Informatics and Computing (ICIC), November 1-3, 2017, Jayapura, Indonesia: 1-6.

收稿日期: 2021-01-24; 修回日期: 2021-02-06

作者简介:

徐鑫裕(1995—), 男, 硕士研究生, 研究方向为新能源并网稳定性; E-mail: shawn\_1028@163.com

边晓燕(1976—), 女, 通信作者, 博士, 教授, 研究方向为新能源并网稳定性。E-mail: bianxy@shiep.edu.cn

(编辑 张爱琴)