

# 永磁直驱机组叶轮质量不平衡故障建模及仿真研究

邓小文<sup>1</sup>, 潘巧波<sup>1,2</sup>, 高庆水<sup>1</sup>

(1. 广东电网有限责任公司电力科学研究院, 广东 广州 510080;

2. 东北电力大学自动化工程学院, 吉林 吉林 132012)

**摘要:** 针对风力机叶轮质量不平衡故障对风电机组安全稳定运行的严重影响问题, 在对该故障形成机理简要阐述后, 理论推导了该故障对永磁同步发电机转速及电磁功率造成的影响。利用 Matlab/Simulink 建立在故障状态下包含风力机、传动部件及发电机的风机模型, 从定量角度设置不同的仿真算例, 分析电机转速和电磁功率信号时域及频谱曲线特征及变化。分析结果显示其包含电机旋转的一倍频分量和二倍频分量, 且随着不平衡质量的增大而增大。在湍流风速条件下, 电机旋转及电磁功率频谱在低频段呈现连续尖峰。该方法可以应用到直驱风电机组故障诊断系统中质量不平衡故障的判别和不平衡质量的确定。

**关键词:** 风力机; 永磁同步电机; 质量不平衡; 故障建模; 故障诊断

## Research on the modeling and simulation of permanent magnet direct-driven wind turbine rotor imbalance fault

DENG Xiaowen<sup>1</sup>, PAN Qiaobo<sup>1,2</sup>, GAO Qingshui<sup>1</sup>

(1. Electric Power Research Institute of Guangdong Power Grid Co., Ltd., Guangzhou 510080, China;

2. School of Automation Engineering, Northeast Electric Power University, Jilin 132012, China)

**Abstract:** Aiming at the problem that the rotor mass imbalance has a strong impact on the safe and stable operation of the wind turbine generators, the impact of the fault on the motor speed and generator power is derived theoretically based on the description of the mechanism of the failure. Matlab/Simulink model which contains the wind turbine model, driven train model and the generator model under the fault state is established. Setting up different simulation examples from the quantitative point of view, signal feature and change curves of motor speed and generator power in both time domain and spectrum domain are analyzed accordingly. And the motor speed and generator power signal are obtained which have detected the 1st frequency and 2nd frequency of the rotor under the fault. With the imbalance increasing, the amplitude of 1st frequency and 2nd frequency is increased too. In the turbulent wind speed conditions, the motor speed and electromagnetic power spectrum in the low frequency band show continuous spikes. The method can be applied to the direct-driven wind turbine fault diagnosis system to identify the rotor mass imbalance and determine the size of the imbalance mass.

This work is supported by National Science and Technology Support Program of China (No. 2015BAA06B02).

**Key words:** wind turbine; PMSM; mass imbalance; fault modeling; fault diagnosis

## 0 引言

近十年来, 随着国家能源战略重点的转移, 以风电、光伏等为代表的清洁能源得到长足的发展<sup>[1-4]</sup>。就风电机组单机容量而言, 国内主流机型单机容量已经从2005年的750~850 kW增加到2015年的2.5~

3.0 MW; 就风力发电技术发展趋势来看, 已经由早期的定速型风机向独立变桨型风机转变, 以海上风电为代表的大型机组也逐步采用永磁直驱或半直驱的发电方式<sup>[5-6]</sup>。风力发电快速发展的同时, 机组潜在的质量问题以及传统控制策略的局限日益凸显, 所以针对机组故障情况下的建模仿真以及故障诊断已经成为新的研究热点。

文献[7]建立了750 kW定桨距风力机叶轮质量

不平衡故障模型,通过对机组电磁功率的分析得出功率信号变化趋势与不平衡质量之间的关系,该方法可运用于叶轮质量不平衡故障的初步分析诊断。文献[8]通过对风力发电机转矩功率谱密度分析实现叶轮质量、气动不平衡故障的初步诊断。文献[9]分析了永磁直驱机组叶轮不平衡和绕组不对称两种故障对发电机定子电流的影响,对利用快速傅里叶变换(Fast Fourier Transform, FFT)得到的定子电流模平方信号进行频谱分析,利用分析得到的模平方信号中特征频率、幅值的变化及特征实现叶轮不平衡和绕组不对称故障的诊断。同样,文献[10-11]通过提取风电机组叶轮不平衡故障下定子电流的信号特征,采用引入导数分析思路和希尔伯特包络解调的两种不同方法,分别提出有效的不平衡故障诊断方法。文献[12]针对叶轮不平衡情况下的载荷特性及转速的变化规律,提出一种谐振频率自适应于叶轮转速的PI-谐振独立变桨的控制策略,有效地减少了不平衡周期载荷及其对机组带来的影响。文献[13]针对叶轮不平衡问题,提出了一种基于反向传播神经网络的直驱风力发电机的故障诊断方法,可运用于在线故障诊断。

所述文献的关注点主要集中在叶轮不平衡故障情况下,所造成机组在发电机电磁功率、定子电流、风力转速控制等方面的影响,并利用其信号变化特征及频谱分析、诊断故障及严重程度。但缺乏不平衡故障形成的机理分析,及其客观造成对机组影响和各项指标变化的理论推导。本文针对叶轮质量不平衡故障,建立了永磁直驱机组的整机模型,在理论上分析了不平衡质量引起机组电磁功率及转速波动的原因。通过Matlab/Simulink仿真实验得到故障条件下电机电磁功率及转速的响应曲线,利用FFT变换实现信号的时频转换并进行特征分析,进而实现对机组的叶轮质量不平衡故障诊断。

## 1 永磁直驱机组建模

永磁直驱风电系统一般包括风力机、永磁同步电机(Permanent Magnet Synchronous Motor, PMSM)、双PWM(Pulse Width Modulation, PWM)整流逆变装置等,基本结构如图1所示。

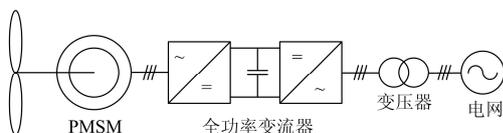


图1 永磁直驱风力发电系统

Fig. 1 Permanent magnet direct-driven wind power system

### 1.1 叶轮质量不平衡模型

风力机是风电系统能量转换的主要部件,其中叶尖速比 $\lambda$ 、桨距角 $\beta$ 以及风能利用系数 $C_p(\beta, \lambda)$ 是风力机的三个重要参数。风力机建模的方法主要分为两类:(1)基于气动特征;(2)基于叶素动量理论。基于叶素动量理论的建模方法,需要明确叶片机械结构的详尽参数,包括阻力系数 $C_D$ 、升力系数 $C_L$ 随角 $\alpha$ 变化呈现的特征曲线,以及弦长 $l$ 和桨距角随叶轮半径 $r$ 的变化情况等<sup>[14]</sup>。该方法常常运用于气动载荷计算一类的建模,精确度高,模型较为复杂。相较于基于叶素动量理论的建模方法,基于气动特征的建模方法所需参数较少,建立模型较为容易。风能利用系数 $C_p(\beta, \lambda)$ 特征曲线的获得,通过在实验室环境下由风速值和风轮输出机械力矩计算得出,模型本质上也是建立在叶片机械结构特征和固有参数的基础之上。本文所述情况,考虑风速在叶轮平面均匀分布,各叶片气动载荷对称,基于气动特征的建模方法完全符合研究叶轮质量不平衡故障情况下对模型的要求。根据贝茨理论,风力机输出机械力矩为<sup>[15]</sup>

$$\begin{cases} T_1 = \pi \rho R v^2 C_p(\beta, \lambda) / (2\lambda) \\ \lambda = \omega_M R / v \end{cases} \quad (1)$$

式中: $\rho$ 为空气密度; $R$ 为叶轮半径; $\omega_M$ 为叶轮转速(直驱机组中传动良好情况下等于电机转速); $v$ 为风速;机组运行在额定风速及以下工况时, $C_p(\beta, \lambda)$ 及按照最大功率点追踪控制的要求得出的转速目标指令 $\omega^{ref}$ 在仿真实验中采用查表插值的计算方法得到。

对于三叶片水平轴风力机,单一叶片不考虑其机械结构特征,可等效为距离轮毂中心距离 $r_i$ ( $i=1, 2, 3$ ),质量为 $m_i$ ( $i=1, 2, 3$ )的集中质量块。在理想状况下,三个叶片完全相同,其所受重力 $G_i$ ( $i=1, 2, 3$ )及重心位置与轮毂中心距离 $r_i$ ( $i=1, 2, 3$ )相等,由力学分析可知三个力作用在轮毂的合力为0。由于环境条件的变化,风沙雨雪的侵蚀以及叶片长时间旋转受离心力作用等因素均会导致叶片质量的变化,重心的偏移,致使叶轮质量不平衡故障的形成。按照理想状态下叶片的等效方法,叶轮质量不平衡故障可以等效为理想状态下,相对于垂直方向相角为 $\varphi$ ,距离轮毂中心 $r_4$ 的位置,外加一质量为 $m_4$ ,随叶轮以转速 $\omega_M$ 旋转的集中质量块。叶轮质量不平衡故障等效示意图如图2所示。

考虑叶轮质量不平衡故障情况下,由于外加集中质量块重力随着旋转发生的周期性变化,叶轮输出机械转矩更新为

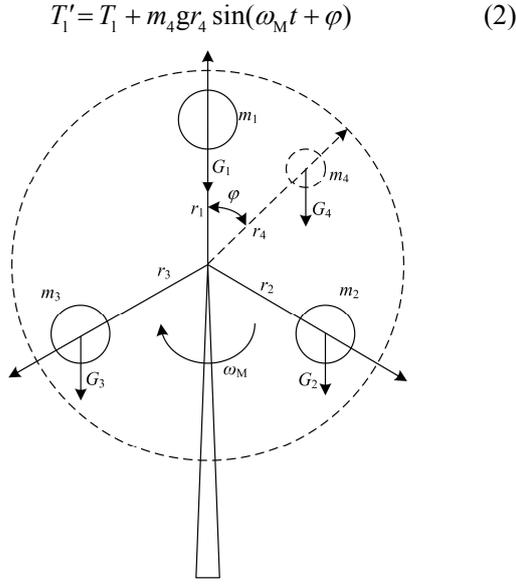


图 2 叶轮质量不平衡故障等效示意图

Fig. 2 Equivalent schematic of rotor mass imbalance fault

### 1.2 叶轮质量不平衡模型

直驱型机组叶轮轮毂通过传动轴与 PMSM 转子轴联, 考虑叶轮和电机转子转动角度客观存在的偏差和轴系刚度, 采用二质量块模型。传动轴机械运动方程概括为<sup>[16]</sup>

$$\begin{cases} J_M \frac{d\omega_M}{dt} = T_1 - K\theta_s - B_M\omega_M \\ J_m \frac{d\omega_m}{dt} = K\theta_s - T_e - B_m\omega_m \\ \frac{d\theta_s}{dt} = 2\pi f(\omega_M - \omega_m) \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $J_M$  为叶轮转动惯量;  $K$  为轴系刚度;  $\theta_s$  为轴系刚度叶轮与 PMSM 转子角度偏差;  $B_M$  和  $B_m$  分别为叶轮转子和电机转子的粘性摩擦系数;  $J_m$  为电机转子转动惯量;  $\omega_m$  为电机转速;  $T_e$  为电磁转矩;  $f$  为电网额定频率。

### 1.3 PMSM 模型

PMSM 作为发电机使用时, 在  $d$ - $q$  轴系下可将定子电压分量方程表示为<sup>[17]</sup>

$$\begin{cases} u_d = -R_s i_d - L_d \frac{di_d}{dt} + \omega_r L_q i_q \\ u_q = -R_s i_q - L_q \frac{di_q}{dt} - \omega_r L_d i_d + \omega_r \psi_f \end{cases} \quad (4)$$

定子磁场在  $dq$  方向上的分量分别为

$$\begin{cases} \psi_d = -L_d i_d + \psi_f \\ \psi_q = -L_q i_q \end{cases} \quad (5)$$

电磁转矩方程为

$$T_e = \frac{3}{2} p_n [\psi_f i_q - (L_d - L_q) i_d i_q] \quad (6)$$

式(4)一式(6)中:  $L_d$  和  $L_q$  为  $d$ 、 $q$  轴电感;  $R_s$  为定子电阻;  $\omega_r$  为转子电角速度;  $\psi_f$  为转子永磁体磁链;  $p_n$  为电机磁极对数, 其中  $\omega_r = p_n \omega_m$ 。当所采用电机为面装式 PMSM 时,  $L_d = L_q = L$ , 则式(6)改为

$$T_e = \frac{3}{2} p_n \psi_f i_q \quad (7)$$

## 2 叶轮质量不平衡故障对机组的影响

上节建立了包括风力机、传动轴、PMSM 在内的永磁直驱机组整机模型。以下从电机电磁功率和转速两方面对叶轮量不平衡故障对机组造成影响进行分析。

### 2.1 叶轮质量不平衡对电磁功率的影响

由电机学知识可知, 结合式(7)得到正弦稳态下电机的电磁功率为<sup>[18]</sup>

$$P_e = \frac{3}{2} \omega_r \psi_f i_q = \frac{2\pi f_1 T_e}{p_n} \quad (8)$$

式中,  $f_1$  为 PMSM 定子频率。

联立式(3), 可推出:

$$T_1 - T_e - J_M \frac{d\omega_M}{dt} - J_m \frac{d\omega_m}{dt} - B_M \omega_M - B_m \omega_m = 0 \quad (9)$$

若忽略转子粘性摩擦和传动轴扭转的影响, 即  $\omega_M = \omega_m$ 、 $B_M = B_m = 0$ , 代入式(9)可得

$$T_1 - T_e - (J_M + J_m) \frac{d\omega_m}{dt} = 0 \quad (10)$$

考虑环境风速保持恒定情况, 按照最大功率点追踪控制要求得出系统转速目标值  $\omega^{\text{ref}}$  保持不变, 此时电机转速波动较小, 考虑叶轮输出机械转矩受不平衡质量块影响, 联立式(2)、式(8)、式(10)可得

$$P_e = 2\pi f_1 \frac{[T_1 + G_4 r_4 \sin(\omega_m t + \varphi)]}{p_n} \quad (11)$$

观察上式可知, 由不平衡质量块引起的脉动转矩, 会直接导致电机电磁功率产生叶轮转速对应的幅值为  $A = 2\pi f_1 G_4 r_4 / p_n$  的 1 倍频分量。

### 2.2 叶轮质量不平衡对电机转速的影响

在叶轮质量不平衡故障情况下, 结合式(10), PMSM 的机械运动方程可以概括为

$$(J_M + J_m) \frac{d\omega_m}{dt} = G_4 r_4 \sin(\omega_m t + \varphi) + T_1 - T_e \quad (12)$$

在脉动转矩的影响下, 转速会产生波动, 可将实际转速  $\omega_m$  分解为

$$\omega_m = \bar{\omega}_m + \sum \omega_{mk} \quad (13)$$

式中:  $\bar{\omega}_m$  为平均转速;  $\omega_{mk}$  为一系列谐波分量。将式(13)代入式(12)可得

$$\omega_m = \frac{1}{J_M + J_m} \int G_4 r_4 \sin(\omega_m t + \varphi) dt + \bar{\omega}_m \quad (14)$$

观察上式可知, 由不平衡质量块引起的脉动转矩是导致电机转速产生 1 次谐波的主要原因之一。风电系统中转动惯量  $J$  值的大小对电机转速波动有较大的影响, 合理地增加转动惯量可以有效抑制转速波动, 但转动惯量过大又会降低系统的动态响应能力。

### 3 仿真分析

基于以上分析, 在 Matlab/Simulink 建立叶轮质量不平衡故障情况下永磁直驱整机模型, 主要包括叶轮质量不平衡风力机模型、传动轴模型、PMSM 模型以及最大功率点控制部分。通过改变不平衡质量块的大小来设置不平衡故障严重程度, 不平衡故障严重程度定量表示为

$$F_T = \frac{T_4}{T_1} \quad (15)$$

式中,  $T_4$  为不平衡质量引起的脉动转矩幅值。

为更加直观地反映叶轮质量不平衡故障对机组带来的影响, 风电系统参数设置采用小型化永磁直驱机组参数, 如表 1 所示。仿真实验分别在恒定风速和湍流风速条件下进行, 提取电机电磁功率及转速信号并进行频谱分析, 提取故障特征。

表 1 仿真参数设置

Table 1 Simulation parameters set

参数描述	数值	单位
额定功率	3500	W
叶轮直径	3	m
切入风速	2.5	m/s
切出风速	22	m/s
额定风速	11	m/s
风轮转动惯量	0.5	kg·m <sup>2</sup>
磁极对数	8	
额定转速	47.4	rad/s
永磁体磁链	0.8	Wb
绕组电感交直轴分量	0.0027	H
定子相绕组电阻	0.01	Ω

#### 3.1 恒定风速下质量不平衡故障特征分析

设置环境风速恒定为 6 m/s, 此时对应的电机转速目标值为 25.8 rad/s, 叶轮旋转频率和定子频率均为 4.1 Hz。在正常状态下以及不平衡故障严重程度为  $F_T=6\%$ 、 $30\%$ 、 $60\%$  状态下分别进行仿真实验, 其中故障状态下提取的电机转速及电磁功率时域波形如图 3、图 4 所示。通过设计切比雪夫 I 型高通滤波器, 过滤掉低于 1/3 倍频(1.5 Hz)低频分量及直

流分量, 然后采用 FFT 变换得出不同严重程度故障状态下所提取的电机转速及电磁功率的频谱, 如图 5、图 6 所示。图中所示  $F_T=6\%$ 、 $30\%$ 、 $60\%$  信号曲线分别用虚线、点横线、实线表示。

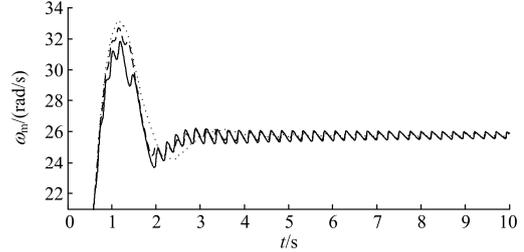


图 3  $F_T=6\%$ 、 $30\%$ 、 $60\%$  状态电机转速时域波形  
Fig. 3 Motor speed time domain waveform under  $F_T = 6\%$ ,  $30\%$ , and  $60\%$  state

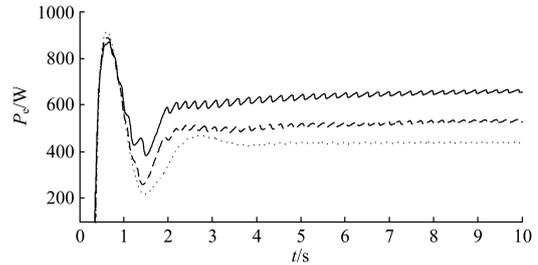


图 4  $F_T=6\%$ 、 $30\%$ 、 $60\%$  状态电磁功率时域波形  
Fig. 4 Electromagnetic power time domain waveform under  $F_T=6\%$ ,  $30\%$ , and  $60\%$  state

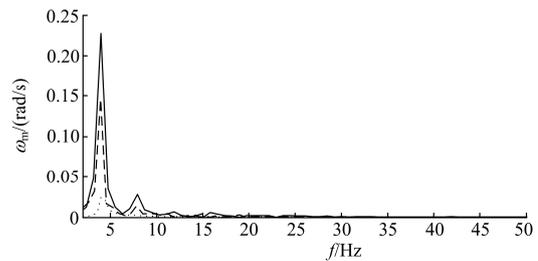


图 5  $F_T=6\%$ 、 $30\%$ 、 $60\%$  状态电机转速频谱  
Fig. 5 Motor speed spectrum under  $F_T=6\%$ ,  $30\%$ , and  $60\%$  state

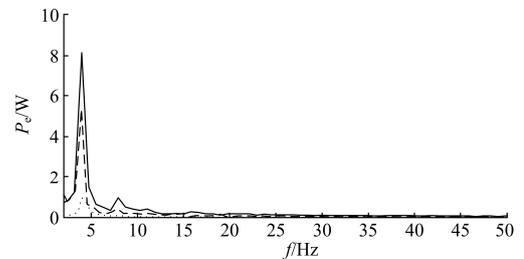


图 6  $F_T=6\%$ 、 $30\%$ 、 $60\%$  状态电磁功率频谱  
Fig. 6 Electromagnetic power spectrum under  $F_T=6\%$ ,  $30\%$ , and  $60\%$  state

由理论计算得到正常状态下, 通过最大功率点控制电机转速恒为 25.8 rad/s, 电磁功率为 432.1 W。由图 3 可知, 不平衡故障严重程度分别在  $F_T=6\%$ 、30%、60% 状态下, 通过控制系统对电机转速的控制, 均能稳定在 25.8 rad/s, 其波动随着不平衡程度的加大而加剧。从频谱上看, 转速信号在  $f=4.1$  Hz (叶轮旋转频率一倍频) 出现尖峰, 二倍频也出现较为明显的尖峰, 且随着不平衡程度的加大而升高。在量上, 尖峰点对应的纵坐标约等于时域波形波动的幅值。由图 4 可知, 随着不平衡程度的加大, 电磁功率出现较大的增长且波动更加剧烈, 从频谱上看, 呈现与转速信号频谱相同的特征。

### 3.2 湍流风速下质量不平衡故障特征分析

采用基于几种分量合成的风速模型模拟湍流风速, 风速值在 5~12 m/s 变化, 如图 7 所示。在正常状态以及不平衡故障严重程度在  $F_T=30\%$  两种状态下分别进行仿真实验。采用与上节相同的数据处理方式, 得到电机转速及电磁功率信号的频谱, 如图 8 和图 9 所示。图中所示正常状态及  $F_T=30\%$  状态, 信号曲线分别用虚线、实线表示。

在风速 5~12 m/s 变化情况下, 按照最大功率点追踪控制要求, 系统转速呈现相同的变化趋势。通过计算得到对应叶轮旋转频率为 3.4~8.2 Hz。由图 8 和图 9 可知, 旋转频率为 3.4~8.2 Hz, 且在不平衡故障状态下, 电机转速及电磁功率信号频谱出现连续的尖峰。相较于故障状态, 在正常状态下, 频谱

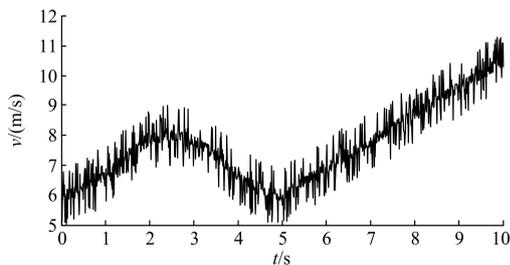


图 7 湍流风速仿真波形

Fig. 7 Simulation waveform of turbulent wind speed

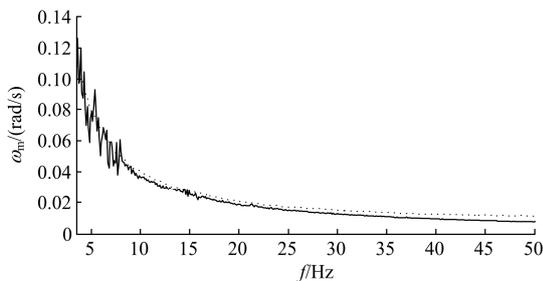


图 8 湍流风速下正常状态及  $F_T=30\%$  状态下电机转速频谱  
Fig. 8 Motor speed spectrum under normal conditions of turbulent wind speed and  $F_T=30\%$  state

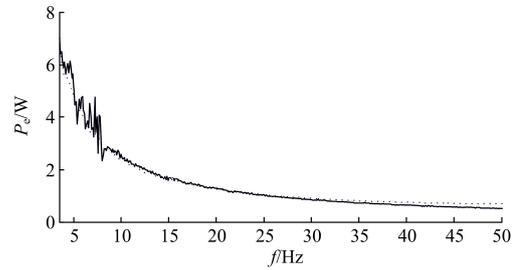


图 9 湍流风速下正常状态及  $F_T=30\%$  状态下电磁功率频谱  
Fig. 9 Electromagnetic power spectrum under normal conditions of turbulent wind speed and  $F_T=30\%$  state

曲线较为光滑且幅值较小, 平均小于不平衡故障状态。

## 4 结论

针对永磁直驱型机组叶轮质量不平衡故障对机组的影响, 在分析其形成机理的基础上, 建立永磁直驱机组故障模型, 在恒定风速和湍流风速条件下分别进行仿真实验, 提取 PMSM 电磁功率和转速信号。分析对比正常状态及不同严重程度故障状态下, 信号在时域和频域上的特征及变化, 进而实现故障诊断。

1) 在恒定风速条件下, 不平衡故障会导致电机转速的波动, 且随着不平衡程度的加大而更加剧烈。通过对频域的分析, 转速的波动在叶轮旋转频率一倍分量得以体现。另外, 不平衡故障同样会导致电磁功率的波动, 且随着不平衡程度的加大还会引起电磁功率的增长, 这会给机组安全稳定运行造成严重的影响。

2) 在湍流风速条件下, 通过对正常状态和故障状态下电机转速和功率的频谱对比分析可知, 机组运行正常的叶轮旋转频率范围内, 故障状态下电机转速和电磁功率的频谱曲线均出现连续尖峰, 且平均幅值大于正常状态。另外, 正常状态下电机转速和功率的频谱曲线呈现由最低叶轮旋转频率对应最大幅值逐渐向 0 衰减的趋势, 且曲线较为光滑。

3) 所建立永磁直驱机组模型很好地表现了叶轮质量不平衡故障形成机理及特征, 通过仿真分析, 验证对电机侧信号的检测分析, 及叶轮质量不平衡故障诊断是可行的, 对风电机组机械故障诊断以及开发风电场智能化在线状态监控系统具有重要意义。

## 参考文献

[1] 王长路, 王伟功, 张立勇, 等. 中国风电产业发展分析[J]. 重庆大学学报, 2015, 38(1): 148-154.  
WANG Changlu, WANG Weigong, ZHANG Liyong, et al.

The analysis of China wind power industry[J]. Journal of Chongqing University, 2015, 38(1): 148-154.

[2] 杨茂, 刘红柳, 季本明. 基于混沌理论的风电功率超短期多步预测的误差分析[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(4): 50-55.  
YANG Mao, LIU Hongliu, JI Benming. Analysis of ultra-short-term prediction error of wind power based on chaos theory[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(4): 50-55.

[3] 初壮, 蹇孝祥, 于群英. 考虑风电随机性的多场景配电网重构[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(1): 132-138.  
CHU Zhuang, DOU Xiaoxiang, YU Qunying. Multi scene distribution network reconfiguration considering the randomness of wind power[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(1): 132-138.

[4] 刘波, 金昊. 永磁直驱风电系统双PWM变换器前馈补偿控制[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(15): 52-57.  
LIU Bo, JIN Hao. Feed forward compensation control of dual PWM converter for permanent magnet direct driven wind turbine[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(15): 52-57.

[5] 潘巧波. 直流微网下混合式永磁风电机组反馈线性化控制策略[J]. 陕西电力, 2016, 44(4): 18-21.  
PAN Qiaobo. DC micro-grid hybrid permanent magnet wind turbine feedback linearization control strategy[J]. Shaanxi Electric Power, 2016, 44(4): 18-21.

[6] 崔杨, 严干贵, 李鸿博. 联网运行风力发电系统的动态建模方法综述[J]. 东北电力大学学报, 2012, 32(6): 1-9.  
CUI Yang, YAN Gangui, LI Hongbo. Review of interconnected wind power system dynamic modeling[J]. Journal of Northeast Dianli University, 2012, 32(6): 1-9.

[7] 杨涛, 任永, 刘霞, 等. 风力机叶轮质量不平衡故障建模及仿真研究[J]. 机械工程学报, 2012, 48(6): 130-135.  
YANG Tao, REN Yong, LIU Xia, et al. Research on the modeling and simulation of wind turbine rotor imbalance fault[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(6): 130-135.

[8] GARDELS D J, QIAO W, GONG X. Simulation studies on imbalance faults of wind turbines[C] // 2010 IEEE Power and Energy Society General Meeting, July 25-29, 2010, Providence, USA: 1-5.

[9] 杭俊, 张建忠, 程明, 等. 直驱永磁同步风电机组叶轮不平衡和绕组不对称的故障诊断[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(9): 1384-1391.  
HANG Jun, ZHANG Jianzhong, CHENG Ming, et al. Fault diagnosis of blade imbalance and winding asymmetry of direct-driven wind turbine with permanent magnet synchronous generator[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(9): 1384-1391.

[10] 李辉, 杨东, 杨超, 等. 基于定子电流特征分析的双馈风电机组叶轮不平衡故障诊断[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(13): 32-37.  
LI Hui, YANG Dong, YANG Chao, et al. Blade imbalance fault diagnosis of doubly fed wind turbines based on stator current feature analysis[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(13): 32-37.

[11] LI Y G, SHENG X L, WAN S T, et al. Blade mass imbalance fault diagnosis using rotor and stator current based on coordinate transformation and HED[C] // 2016 IEEE 8th International Power Electronics and Motion Control Conference (IPEMC-ECCE Asia), May 22-26, 2016, Hefei, China: 987-992.

[12] 杨超, 李辉, 胡姚刚, 等. 叶轮不平衡下的风力机自适应独立变桨控制策略[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(15): 35-41.  
YANG Chao, LI Hui, HU Yaogang, et al. An adaptive individual pitch control strategy of wind turbines with unbalanced rotor[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(15): 35-41.

[13] AN X L, JIANG D X, LI S H. Application of back propagation neural network to fault diagnosis of direct-drive wind turbine[C] // 2010 World Non-Grid-Connected Wind Power and Energy Conference (WNWEC), November 5-7, 2010, Nanjing, China: 1-5.

[14] 韩雪皎. 风电机组建模仿真技术研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2012.  
HAN Xuejiao. A research on modeling and simulation technology of wind turbine[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2012.

[15] 刘其辉, 贺益康, 赵仁德. 基于直流电动机的风力机特性模拟[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(7): 134-139.  
LIU Qihui, HE Yikang, ZHAO Rende. Limitation of the characteristic of wind turbine based on DC motor[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(7): 134-139.

[16] 朱翔. 兆瓦级并网型永磁直驱风电机组建模与控制[D]. 上海: 上海交通大学, 2013.  
ZHU Xiang. Modeling and control of MW permanent magnet direct-driven wind power system connected to the grid[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2013.

[17] 刘波, 潘巧波. 大型直驱风电机组快速响应控制策略[J]. 电机与控制应用, 2015, 42(11): 62-66.  
LIU Bo, PAN Qiaobo. Large direct-drive wind power system to quickly respond to control strategy[J]. Electric Machines & Control Application, 2015, 42(11): 62-66.

[18] 王成元, 夏加宽, 孙宜标. 现代电机控制技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2013.

---

收稿日期: 2017-02-13; 修回日期: 2017-05-07  
作者简介:  
邓小文(1974—), 男, 工学博士, 教授级高级工程师, 研究方向为风力发电机组振动监测、故障诊断及处理; E-mail: gzdwx@163.com  
潘巧波(1993—), 男, 通信作者, 工学硕士, 研究方向为风力发电控制技术; E-mail: qbpan@foxmail.com  
高庆水(1983—), 男, 工学硕士, 高级工程师, 研究方向为风力发电设备状态监测。E-mail: gqshui@yahoo.cn  
(编辑 姜新丽)