

风力机气动力不对称故障建模与仿真*

冯永新¹, 杨涛^{1,2}, 任永², 黄树红², 高伟², 陈刚²

(1. 广东电网公司电力科学研究院 广州, 510080) (2. 华中科技大学能源与动力工程学院 武汉, 430074)

摘要 风力机气动力不对称故障对风力发电机组的安全稳定运行有很大的影响, 传统的基于振动的故障诊断方法需要在风力机上安装大量的传感器, 成本较高, 可靠性也较差。近年来, 已有学者采用基于电信号的故障诊断方法对该故障进行了实验研究, 但未对该诊断方法进行理论上解释。笔者研究了气动力不对称故障下的风力机的塔架振动和气动力的耦合规律, 阐述了造成电功率波动的机理, 指出电功率的波动来源于塔架的振动, 建立了整个风力机组故障状态下的模型, 仿真得到了故障条件下的塔架振动信号与电功率信号, 对仿真得到的振动信号与电信号进行信号处理。结果显示其中均出现了叶轮旋转的一倍频分量, 与德国 ISET 等实验研究的结果相符, 对开发新的故障诊断算法具有重要意义。

关键词 风力机; 气动力不对称; 故障建模; 电功率信号

中图分类号 TH17; TK8

引言

近年来, 随着风电行业的快速发展, 风力机的安全稳定运行日益引起人们的关注, 风力机故障会造成风电机组运营商经济上的巨大损失, 风力机气动力不对称故障就是其中的一种; 特别是风力机的容量越来越大, 叶轮直径越来越大, 塔架高度也越高, 该故障会引起风力机整体结构的巨大振动在各部件中造成疲劳应力进而影响到风力机的寿命。针对该故障, 很多学者进行了振动的实验研究。德国 ISET 研究所^[1-2], 对气动力不对称故障进行了大量的实验研究, 指出该故障会引起塔架 fore-aft 方向的振动, 但未从理论上对其进行详细论述。蒋东翔等^[3]指出该故障会引起风力机主轴的振动, 且频率成分中包含叶轮旋转的一倍频分量并通过实验给予了验证。在理论研究上, Ramlau 等^[4]分析了风力机质量不平衡与气动力不对称故障引起的振动, 并通过反向工程研究识别风力机叶轮不平衡质量的大小与方位, 但没有考虑到塔架振动与叶轮所受的气动力之间的耦合性, 模型略显粗糙。文献[5-6]利用 NREL 开发的 FAST 软件结合 matlab 平台对该故障的电信号的影响进行了研究, 采用适当的信号处理方法

在电功率信号中提取出了叶轮的旋转一倍频分量, 与实验结果相符, 但故障对塔架振动的影响则未作分析, 同时也未阐述故障影响电功率信号的机理。

笔者研究了气动力不对称故障下的风力机的塔架振动和气动力的耦合规律, 建立了风力机整机动力学模型, 利用 matlab/simulink 构建了 1.5 MW 的定速风力机仿真模型, 并进行了仿真。仿真结果清楚阐述了故障是如何由叶轮影响到塔架引起其振动, 同时影响发电机端引起电功率波动。

1 气动力不对称概述

如图 1 所示, 在正常状态下三个叶片完全相同, 且安装角均为 θ , 当风速相等时, 三个叶片相同位置叶素所受相对风速 V_r 相等, 故气流攻角相同均为 α , 产生的气动力是完全相等的。针对某一叶素, 气动力分解得到的轴向推力 dF_x 也相等, 由于叶轮几何结构对称性, 轴向推力相对旋转轴线的合力矩为 0。由于某些原因, 比如由于安装偏差引起的 3 个叶片桨距角不等或者变桨系统故障等会引起 3 个叶片所受气动力不等, 出现气动力不对称的故障状态。

当其中一叶片安装角由 θ 变为 θ^* 时, 在相对风速 V_r 不变的情况下, 攻角由 α 变为 α^* , 进而气动力

* 国家自然科学基金资助项目(51105151)
收稿日期: 2012-09-21; 修回日期: 2013-03-12

分解得到的轴向推力由 dF_x 变为 dF_x^* , 由于构成叶轮的 3 个叶片所受 3 个轴向推力不相等, 随着叶轮的旋转, 塔架与机舱受到交变的载荷而发生前后方向 (fore-after) 受迫振动。在该振动作用下, 相对叶轮的来流风速也会发生周期性变化, 进而导致气动力的波动, 气动力的波动反过来又会影响到塔架与机舱所承载荷, 进而引起塔架振动, 因而当存在气动力不对称故障时, 塔架的结构振动与叶轮所受气动力存在强耦合性。另外, 气动力的波动会引起叶轮输出扭矩的波动, 最终又会影响到发电机端电功率。

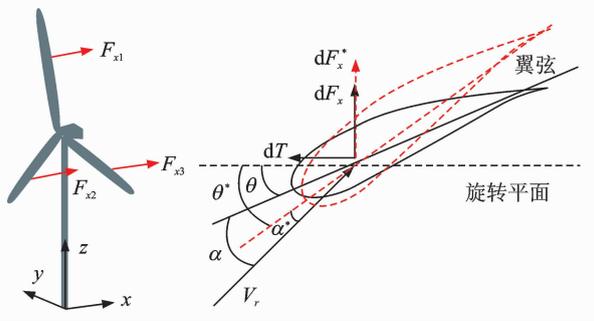


图 1 气动力不对称故障下风力机受力示意图
Fig. 1 The schematic of the wind turbine under stress when the aerodynamic force is asymmetric

2 风力机气动力不对称故障建模

根据风力机做功原理, 可构建风力机系统模型, 如图 2 所示。

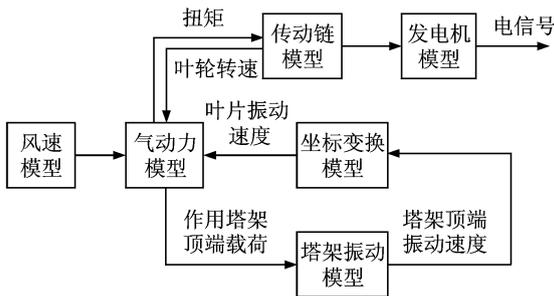


图 2 风力机模型框图
Fig. 2 The diagram of the wind turbine model

从图 2 可以看出, 模型主要由 6 个模块构成。风速模型用来提供驱动力。气动力模型利用动量叶素理论来完成, 用于计算作用于叶片上的气动载荷, 当风力机处于气动力不对称故障状态下, 气动力模型就需要考虑该故障的影响。同时, 在不对称的气动力作用下, 塔架会产生前后的振动, 塔架振动模型

用于计算塔架的振动, 主要输入信号为由气动力模型计算得到的作用于塔架顶端的载荷。由于塔架变形振动使得叶轮整体具有一定的速度, 这对气流相对速度造成了影响, 因此还要获知气流相对各个叶素相对速度。坐标变换模型利用塔架振动模型计算得到的塔架顶端的振动位移与速度计算得到气流相对叶片各叶素的相对速度。传动链模型与电机模型分别根据各自的运动特性建立, 利用叶轮输出的扭矩仿真得到发电机端电信号, 同时得到叶轮转速信号。

2.1 风速建模

风是大自然的产物, 其大小与方向无时无刻都在发生变化, 随机性很强, 一般认为风速可由缓慢变化的基本分量和快速变化的瞬态分量构成。目前针对风速模型有多种建模方法^[7-8], 比较简单的风速建模方法是将风速看作 4 种分量的合成, 包括: 基本风、阵风、斜坡分量与噪声分量, 其中后三种构成了快速变化的分量。由于文中的研究重点不在风速建模上面, 因此采用基本风、阵风、斜坡分量与噪声分量进行风速建模即可满足需要, 具体模型表达式参见文献[7]。

2.2 气动力建模

目前有多种理论用于计算风力机的气动载荷, 文中采用动量叶素理论建立风力机叶轮气动力模型。其基本思想是: 假定整个叶片可被分割为很多小的相互独立的叶素单元, 各个叶素单元的气动力可以由二维翼型的气动特性来计算, 将各个叶素所受到的气动力叠加即可求得作用于叶片上的推力和转矩。

图 3 为风力机叶片半径 r 、厚度 dr 处翼型气流速度三角形与受力示意图。图中: 虚线为叶轮旋转平面; V_∞ 为来流风速; ω_r 为该处叶素的旋转线速度; a 与 b 分别为轴向与周向诱导因子; V_r 为气流相对翼型的相对风速, 叶轮旋转平面与相对风速的夹角 φ 即为入流角, $\varphi = \alpha + \beta$; 旋转平面与翼型弦线的夹角 β 为该处翼型的局部桨距角。相对风速与弦线的夹角 α 为气流攻角, 在气流的作用下, 翼型受到气动力可以分解为平行于相对风速方向的气动阻力 dF_d 及垂直于相对风速方向的 dF_l , 这两个力又可以沿着平行和垂直叶轮旋转平面方向进行分解, 最终得到驱动叶轮旋转的转矩 dT 和垂直叶轮旋转平

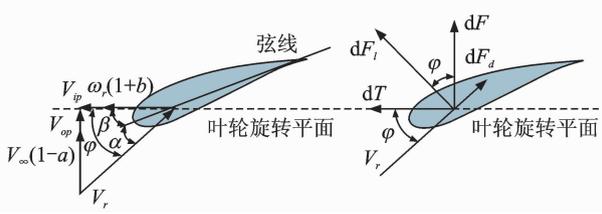


图3 叶片半径 r 处翼型气流速度三角形与受力示意图

Fig. 3 The velocity triangle and stress schematic of airflow with the leaf blade radius is r

面的推力 dF 。

当存在气动力不对称故障时,根据前面所述,可知,塔架的结构振动与叶轮所受气动力存在强耦合性。针对图3,引入速度 V_{op} 和 V_{ip} 。其中: V_{op} 为由于塔架变形振动等引入的方向垂直于叶轮旋转平面的速度; V_{ip} 为由于塔架变形振动等引入的方向与叶素旋转线速度同向的速度。在气动力不对称故障状态下,随着塔架的变形振动,机舱与叶轮均会发生相应的振动, V_{op} 与 V_{ip} 均需要考虑塔架附带叶轮自身振动对其造成的影响。由此可得,在叶轮旋转平面上气流相对叶素的相对速度 V_{ry} 与垂直叶轮旋转平面上气流相对叶素的相对速度 V_{rx} : $V_{ry} = \omega_r + V_{ip}$, $V_{rx} = V_{\infty} + V_{op}$ 。这样在气动力不对称状态下,叶素的翼型气流速度三角形由图3变为图4。

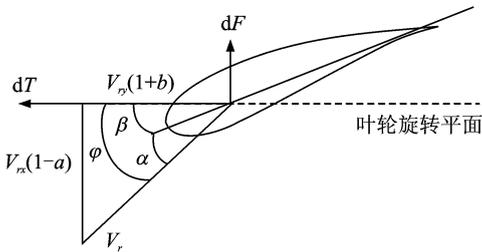


图4 气动力不对称故障下叶片半径 r 处翼型气流速度三角形示意图

Fig. 4 The velocity triangle schematic of airflow with leaf blade radius is r under the fault of the asymmetric aerodynamic force

根据图4,由叶素理论可以计算得到作用于叶素的推力与转矩

$$dF = 0.5B\rho \frac{V_{rx}^2(1-a)^2}{\sin^2\varphi} (C_l \cos\varphi + C_d \sin\varphi) c dr \quad (1)$$

$$dT = 0.5B\rho \frac{V_{rx}^2(1-a)^2}{\sin^2\varphi} (C_l \sin\varphi - C_d \cos\varphi) cr dr \quad (2)$$

应用动量守恒定理,同样可以求得该推力与转矩

$$dF = 4f_{\text{loss}}\pi r^2 \rho V_{ry}^2 a(1-a) dr \quad (3)$$

$$dT = 4f_{\text{loss}}\pi r^2 \rho V_{ry} V_{rx} b(1-a) dr \quad (4)$$

入流角为

$$\tan\varphi = \frac{V_{rx}(1-a)}{V_{ry}(1+b)} \quad (5)$$

其中: r 为叶素距离旋转轴线的距离; ρ 为空气密度; a, b 分别为轴向与周向诱导因子; B 为叶片个数; c 为翼型弦长; C_l, C_d 分别为升力与阻力系数; f_{loss} 为叶尖与轮毂损失修正系数,文中采用普朗特修正系数。

若进一步考虑大叶尖速比运行状态下(比如在低风速下运行的定速型风力机)经典动量叶素理论存在的误差,笔者采用 Buhl^[9] 提出的修正模型对轴向诱导因子进行修正

$$a = \frac{18f_{\text{loss}} - 20 - 3\sqrt{C_T(50 - 36F) + 12F(3F - 4)}}{36F - 50} \quad (6)$$

其中: C_T 为推力系数

$$C_T = \frac{\sigma'(1-a)^2(C_l \cos\varphi + C_d \sin\varphi)}{\sin^2\varphi} \quad (7)$$

联立式(1)~(5),迭代计算出轴向诱导因子 a 与轴向诱导因子 b ,进而求得该叶素受到的气动推力与转矩。将所有叶素的轴向推力 dF 与扭矩 dT 叠加,即求得气动力作用在叶轮上的轴向推力 F 与扭矩 T 。

2.3 塔架振动建模

叶轮的气动载荷最终传递到机舱与塔架上,使塔架产生变形,进而使得位于塔架顶端的机舱与叶轮发生振动。笔者只考虑塔架在 fore-after 方向的振动,如图5所示,采用假设模态法^[10] 计算塔架的

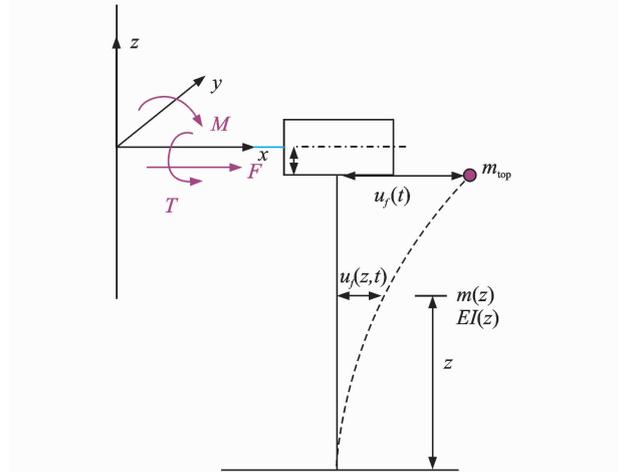


图5 塔架 fore-after 方向振动示意图

Fig. 5 The vibration schematic of tower with the direction of fore-after

振动响应。

将塔架顶端的叶轮与机舱等效为一集中质量 m_{top} , 其相对塔架顶端 y 轴线转动惯量为 J_{top} , 塔架高度为 H , 塔架高度为 z 处截面的面密度为 $m(z)$, 抗弯刚度为 $EI(z)$, 塔架与该集中质量构成一悬臂梁结构。假设模态法假定塔架不同截面处的振动位移是由塔架各阶振型按照各自的振幅振动并线性叠加的结果, 实际上, 一般取塔架最低的二阶模态振型线性叠加即可取得较准确的结果。文中塔架的模态振型函数为一阶振型函数 $\psi_1(z)$ 与二阶振型函数 $\psi_2(z)$, 该模态振型可以由有限元的方法计算获取。文中采用了该塔架已经计算拟合好的归一化振型, 即在塔架顶端, 振型的幅值为 1, 振型函数值 $\psi_1(H) = \psi_2(H) = 1$ 。由于考虑了塔架的两阶模态, 塔架的振动可以由一个两广义自由度系统模型来表征, 两个广义自由度分别为塔架顶端一、二阶模态振幅, 设该方向一、二阶模态振幅为 $u_{1f}(t)$ 与 $u_{2f}(t)$, 则塔架高度为 z 处截面在某一时刻两个方向的振动位移

$u_f(z, t)$ 可以表示为两阶模态振幅的线性叠加, 即

$$u_f(z, t) = \psi_1(z)u_{1f}(t) + \psi_2(z)u_{2f}(t) \quad (8)$$

任一时刻 t , 塔架顶端 (高度为 H) 上振动位移计算为

$$u_f(H, t) = \psi_1(H)u_{1f}(t) + \psi_2(H)u_{2f}(t) = u_{1f}(t) + u_{2f}(t) \quad (9)$$

采用虚功原理计算得到各阶模态振幅, 该振动模型可以由两自由度动力学方程来表征, 其动力学方程为

$$\mathbf{m}^* \ddot{\mathbf{U}}_f(t) + \mathbf{c}^* \dot{\mathbf{U}}_f(t) + \mathbf{k}^* \mathbf{U}_f(t) = \mathbf{F}_f^*(t) \quad (10)$$

其中: \mathbf{m}^* 为广义质量; \mathbf{c}^* 为广义阻尼; \mathbf{k}^* 为广义刚度; \mathbf{F}_f^* 为广义力; $\mathbf{U}_f(t)$ 为广义自由度, 即塔架在该方向一、二阶模态振幅, 为待求自变量。

$$\mathbf{U}_f(t) = \begin{bmatrix} u_{1f}(t) \\ u_{2f}(t) \end{bmatrix} \quad (11)$$

\mathbf{m}^* , \mathbf{c}^* 与 \mathbf{k}^* 为模型常系数, 可由虚功原理计算如下

$$\mathbf{m}^* = \begin{bmatrix} \int_0^H m(z)\psi_1^2(z)dz + m_{top} + J_{top}\psi_1'(H) & 0 \\ 0 & \int_0^H m(z)\psi_2^2(z)dz + m_{top} + J_{top}\psi_2'(H) \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{k}^* = \begin{bmatrix} \int_0^H EI(z)\psi_1''(z)^2 dz & 0 \\ 0 & \int_0^H EI(z)\psi_2''(z)^2 dz \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{c}^* = \begin{bmatrix} 2\delta_1 \int_0^H EI(z)\psi_1''(z)^2 dz / \omega_1 & 0 \\ 0 & 2\delta_2 \int_0^H EI(z)\psi_2''(z)^2 dz / \omega_2 \end{bmatrix}$$

其中: δ_1 与 δ_2 分别为塔架在该方向一阶与二阶模态阻尼比; ω_1 与 ω_2 为一阶与二阶模态圆频率。

由于各阶模态之间的正交性, 各矩阵仅主对角线的值不为 0, 在 \mathbf{m}^* , \mathbf{c}^* 与 \mathbf{k}^* 计算得到后, 可以据此计算出塔架的各阶无阻尼固有频率

$$f_n = \frac{\sqrt{\mathbf{k}^* / \mathbf{m}^*}}{2\pi}$$

由虚功原理, 广义力为产生单位广义位移外力所作的功。如图 5 所示, 在 fore-after 方向产生单位广义位移时做功的外力, 包括气动力分解得到的垂直于叶轮旋转平面的轴向推力 F 与叶轮在气动力与自身重力作用下, 作用于主轴的弯矩 M , 广义力计算为

$$\mathbf{F}_f^*(t) = \begin{bmatrix} F(t) + M(t)\psi_1'(H) & 0 \\ 0 & F(t) + M(t)\psi_2'(H) \end{bmatrix} \quad (12)$$

轴向推力 $F(t)$ 由式(1)计算, $M(t)$ 由式(13)计算得到

$$M(t) = M_G + h_z * F(t) \quad (13)$$

其中: M_G 为叶轮与机舱自身重力作用于塔架的弯矩; h_z 为叶轮旋转轴线与塔架顶端的偏移。

2.4 坐标变换模型

由于在气动力不对称故障状态下, 塔架在 fore-after 方向发生振动, 塔架的振动影响了来流相对叶片各个叶素的相对速度, 因此需要通过坐标变换来计算来流相对叶片各叶素相对速度的大小。

如图 6 所示, 共定义了 4 个坐标系, 分别由向量 $\mathbf{X}_i = (x_i, y_i, z_i)$ ($i=1, 2, 3, 4$) 表征, 坐标系 1 固定在塔架底部, 由于塔架底座固定不动, 该坐标系为绝对坐标系。坐标系 2 固定在塔架顶端, 随着塔架的前后振动而运动, 其 z 方向始终沿着塔架顶端切线方

向,相对坐标系 1,坐标系 2 原点在 x, y 与 z 方向分别偏移了 $u_f(t), 0$ 与 H ,绕 y 轴旋转了角度 $\delta_f(t)$,则坐标系 1,2 之间变换关系为

$$\mathbf{X}_2 = \mathbf{a}_{12} \mathbf{X}_1 + [-u_f(t), 0, -H]^T \quad (14)$$

其中: \mathbf{a}_{12} 为变换矩阵

$$\mathbf{a}_{12} = \begin{bmatrix} \cos\delta_f(t) & 0 & -\sin\delta_f(t) \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\delta_f(t) & 0 & \cos\delta_f(t) \end{bmatrix}$$

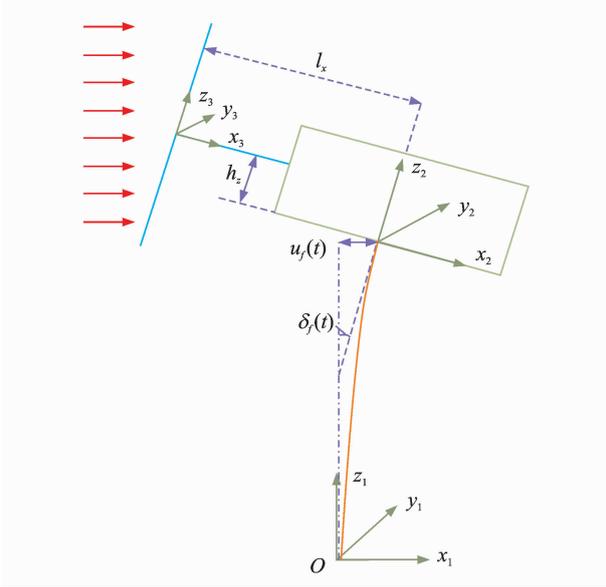


图6 坐标变换示意图

Fig. 6 Schematic of coordinate transformation

坐标系 3 固定在轮毂处,但不随叶轮的旋转而旋转,其与坐标系 2 相对静止,仅原点发生了偏移,坐标系 2,3 之间变换关系为

$$\mathbf{X}_3 = \mathbf{a}_{23} \mathbf{X}_2 + [l_x, 0, h_z]^T \quad (15)$$

由于没有旋转变换, \mathbf{a}_{23} 为单位矩阵

$$\mathbf{a}_{23} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

针对每个叶片均固定一个坐标系 4, z 方向始终沿着叶片轴线,相对坐标系 3,其随叶轮的旋转而绕 x 轴旋转角度 $\theta(t)$,坐标系 3 与坐标系 4 之间变换关系为

$$\mathbf{X}_4 = \mathbf{a}_{34} \mathbf{X}_3 \quad (16)$$

其中:变换矩阵 \mathbf{a}_{34} 为

$$\mathbf{a}_{34} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta(t) & \sin\theta(t) \\ 0 & -\sin\theta(t) & \cos\theta(t) \end{bmatrix}$$

由式(14)~(16)可得坐标系 1,4 之间的变换关

系为

$$\mathbf{X}_4 = \mathbf{a}_{34} \mathbf{a}_{23} \mathbf{a}_{12} \mathbf{X}_1 + \mathbf{a}_{34} \mathbf{a}_{23} [-u_f(t), 0, -H]^T + \mathbf{a}_{34} [l_x, 0, -h_z]^T \quad (17)$$

叶片上半径为 r 处叶素参照坐标系 4,其坐标为 $\mathbf{X}_4 = (0, 0, r)$,利用式(17)可以计算出其在绝对坐标系 1 下的坐标 $\mathbf{X}_1 = (x_1, y_1, z_1)$,再将其对时间求一次导,即得出其在惯性坐标系 1 下的绝对速度 $\mathbf{V}_1 = (\dot{x}_1, \dot{y}_1, \dot{z}_1)$,结果为

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{y}_1 \\ \dot{z}_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_x \omega_f \sin\delta_f + r(\omega_f \cos\delta_f \cos\theta - \omega \sin\delta_f \sin\theta) + \omega_f h_z \cos\delta_f + \dot{u}_f \\ -r\omega \cos\theta \\ l_x \cos\delta_f + r(-\omega_f \sin\delta_f \cos\theta - \omega \sin\theta \cos\delta_f) \end{bmatrix} \quad (18)$$

其中: $\omega_f = \dot{\delta}_f$ 为塔架顶端 for-aft 方向旋转角速度; ω 为叶轮旋转角速度。

来流风速矢量在绝对坐标系下可表示为 $\mathbf{V}_0 = (v_0, 0, 0)$,则气流相对该叶素的相对速度为 $\mathbf{V}_{r1} = \mathbf{V}_0 - \mathbf{V}_1$ 。将该相对速度转为坐标系 4 下的速度 \mathbf{V}_{r4} ,即得动量叶素理论中翼型速度三角形中,气流相对翼型的轴向速度分量 \mathbf{V}_{rx} 与周向速度分量 \mathbf{V}_{ry} ,转换关系为

$$\mathbf{V}_{r4} = [\mathbf{V}_{rx}, \mathbf{V}_{ry}, \mathbf{V}_{rz}]^T = \mathbf{a}_{34} \mathbf{a}_{23} \mathbf{a}_{12} \mathbf{V}_{r1} \quad (19)$$

在计算得到了气流相对叶素的相对速度 \mathbf{V}_{rx} 与 \mathbf{V}_{ry} 后,根据上节所述即可计算作用于叶片上的气动力。

2.5 传动链建模

构建了叶轮气动力模型,得到了叶轮输出的主扭矩 T ,为了得到在气动力不对称故障状态下的发电机端电信号,还需要建立传动链与发电机模型。采用二质量的风力机传动链模型^[11],考虑了连接轴的扭转刚度与阻尼。

$$\begin{cases} T_{\text{wtr}} - K(\theta_{\text{wtr}} - \theta'_{\text{gen}}) - D(\Omega_{\text{wtr}} - \Omega'_{\text{gen}}) = \\ J_{\text{wtr}} \frac{d\Omega_{\text{wtr}}}{dt} \frac{d\theta_{\text{wtr}}}{dt} = \Omega_{\text{wtr}} \\ K(\theta_{\text{wtr}} - \theta'_{\text{gen}}) + D(\Omega_{\text{wtr}} - \Omega'_{\text{gen}}) - T'_{\text{gen}} = \\ J'_{\text{gen}} \frac{d\Omega'_{\text{gen}}}{dt} \frac{d\theta'_{\text{gen}}}{dt} = \Omega'_{\text{gen}} \end{cases} \quad (20)$$

其中: J_{wtr} 为叶轮转动惯量; T_{wtr} 为叶轮输出扭矩; Ω_{wtr} 为叶轮旋转速度; D 与 K 为传动链轴等效扭转刚度与扭转阻尼; J'_{gen} 为发电机等效到低速轴端

的转动惯量; $J'_{gen} = J_{gen} k^2$, J_{gen} 为发电机转动惯量; k 为齿轮箱变比; T'_{gen} 为发电机等效到低速轴端的电磁转矩, $T'_{gen} = T_{gen} k$, T_{gen} 为发电机电磁转矩; Ω'_{gen} 为发电机等效到叶轮端旋转角速度, $\Omega'_{gen} = \Omega_{gen} / k$, Ω_{gen} 为发电机旋转角速度; θ'_{gen} 为发电机等效到低速轴端的转角; $\theta'_{gen} = \theta_{gen} / k$, θ_{gen} 为发电机的转角。

2.6 发电机建模

针对定速型风力机, 发电机使用的是鼠笼式三相异步电机, 在这里建立定速型鼠笼式异步电机模型^[11]。

在 $d-q$ 参考坐标系下, 鼠笼型感应发电机电磁转矩可由下式计算

$$T_{gen} = 1.5 n_p L_m (i_{qs} i_{dr} - i_{ds} i_{qr}) \quad (21)$$

定子端发出的有功功率为

$$P_e = 1.5 (u_{ds} i_{ds} + u_{qs} i_{qs}) \quad (22)$$

其中: n_p 为发电机极对数; L_m 为互感; u 为电压; i 为电流; s 与 r 分别代表定子与转子。

3 仿真与分析

建立了风力机在气动力不对称故障状态下的完整仿真模型, 并利用 matlab/simulink 进行仿真, 模型采用的风力机数据来源于 FAST 软件提供的名为 WP 1.5 MW 的风机模型, 其基本参数如表 1 所示。

在正常状态下, 模型的 3 个叶片桨距角均设置为 7.5° , 如图 7 所示。当模拟气动力不对称故障时,

三叶片的桨距角分别设置为 $5.5, 7.5, 7.5^\circ$, 即三叶片中有一个叶片桨距角存在 2° 的偏差。为了综合仿真速度与精度, 采用变步长的仿真模式, 得到的仿真数据为非等时间间隔信号即定频率信号, 对信号分析时无法直接施加 FFT 算法, 因此需要采用插值算法, 将仿真数据插值为等时间间隔信号。

表 1 仿真用风力机基本参数

Tab. 1 Basic parameters of wind turbines for simulation

参 数	数值
额定功率/MW	1.5
额定风速/($m \cdot s^{-1}$)	12
叶轮直径/m	70
齿轮箱变比	87.965
轮毂轴线高度/m	84
发电机同步转速/($r \cdot min^{-1}$)	1 800

图 8 为该定速型风力机在正常状态下的各种仿真响应信号。风速如图 8(a) 所示, 从初始的 $10 m/s$ 升到 $50 s$ 的 $12 m/s$, 然后风速开始下降, 直到 $100 s$ 仿真结束时为 $7 m/s$ 。叶轮转速信号如图 8(b) 所示。仿真时设置了叶轮的初始转速为 $20.6 r/min^{-1}$, 可以发现叶轮转速在经过短暂的动态过程之后, 在整体上随着风速的变化而波动, 但在数值上波动不大, 最大值为 $50 s$ 处风速最高时的 $20.7 r/min^{-1}$, 最小值为仿真结束风速最小时的 $20.5 r/min^{-1}$, 分别对应的叶轮旋转 1 倍频约为 0.345 与 $0.3417 Hz$, 最高频率与最低频率差别很小。

图 8(c) 所示为发电机输出功率, 图 8(d) 所示

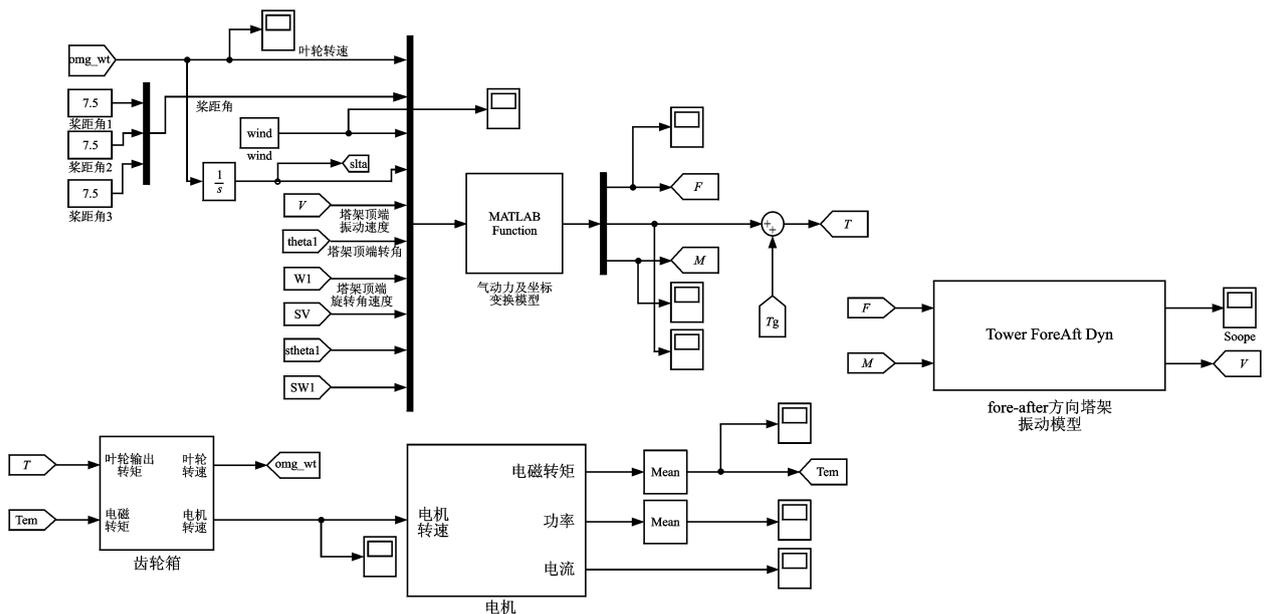


图 7 风力机仿真模型

Fig. 7 The simulation model of the Wind turbine

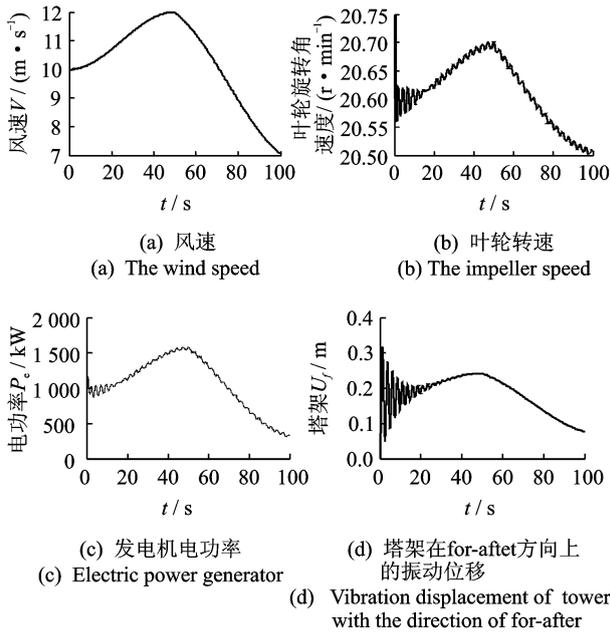


图8 定速型风力机正常状态下风力机响应
Fig. 8 The response of the wind turbine under the normal state

为塔架在 fore-after 方向的振动位移,可以看出其经过短暂动态过程后,变化趋势与风速相同。从图 9 可以看出,在正常状态下,风力机的电功率和塔架振动位移不存在周期频率成分。

图 9 为气动力不对称故障下的仿真结果。仿真

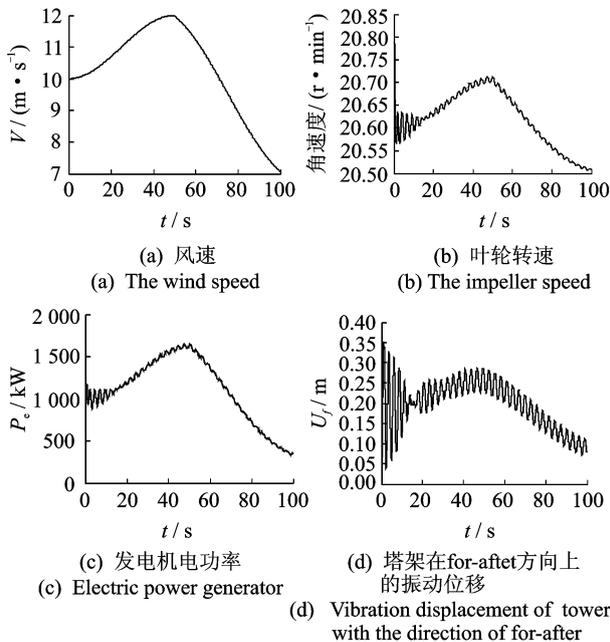


图9 气动力不对称故障下风力机响应
Fig. 9 Wind turbine response under the fault of the asymmetric aerodynamic force

所用风速与正常状态下使用的风速相同,具有上升沿和下降沿两个区段。发电机电功率信号如图 9 (c)所示,稳定后,在波形图上可以看到明显的波动。塔架在在 fore-after 方向上的振动位移如图 9(d)所示,在气动力不对称故障下,塔架在 fore-after 方向的振动位移从整体上来看与风速的变化趋势大致相同,这是由于叶轮所受轴向推力跟随风速的变化而变化,从局部来看,该振动位移波形图在稳态存在明显周期性振动。

图 10 和图 11 是塔架在 fore-after 方向的信号与发电机端电功率信号的频谱图。两者均是在通过滤波器滤掉低于半倍频(0.17 Hz)的低频成分之后利用 FFT 得到的。使用的是高通有限冲击响应型滤波器,截止频率为 0.17 Hz,滤波公式为

$$y(n) = \sum_{i=0}^N a_i x(n-i) \quad (23)$$

其中: $x(n)$, $y(n)$ 分别为滤波输入输出信号序列; N 为滤波器的阶次; a_i 为设计得到的滤波器系数。

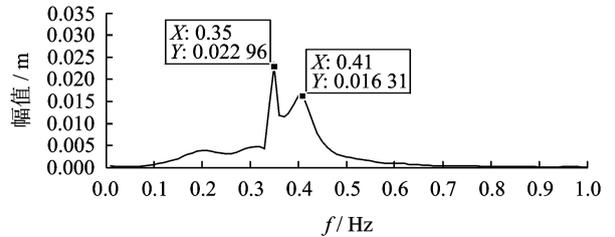


图10 塔架在 fore-after 方向上的振动位移频谱
Fig. 10 Vibration displacement spectrum of tower with the direction of fore-after

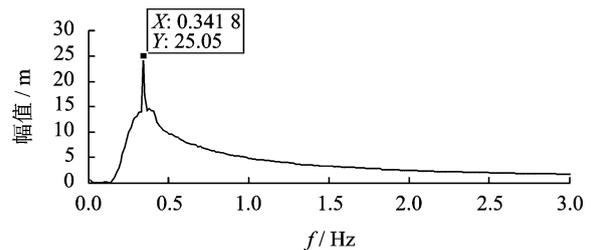


图11 电功率频谱图
Fig. 11 Electric power spectrum

从图 10 可以看出,频谱图上有两个大的极值:一个位于 0.35 Hz 处,幅值为 0.022 969 m,其对应叶轮旋转的一倍频;一个位于 0.41 Hz 处对应的是塔架在 fore-after 方向一阶固有频率。图 11 为电功率频谱图。从频谱图中可以发现其同样包含叶轮旋转的一倍频分量,这与 ISET 实验结果相符。

4 结 论

1) 气动力不对称故障引起塔架的振动信号出现一倍频分量是不平衡的气动推力造成的,造成塔架 fore-after 方向的振动。

2) 针对采用鼠笼式异步电机的定速型风力机,气动力不对称故障最终导致电功率信号出现了明显的一倍频分量,可以通过检测电功率信号中的一倍频分量来监测。

3) 文中所采用的故障建模与仿真的方法能很好地表现出故障的形成与传递过程,可以应用到研究其他故障,特别是研究故障对临近部件造成的影响,对开发新的故障诊断算法有重要意义。

参 考 文 献

- [1] Caselitz P, Giebhardt J. Application of condition monitoring systems in wind energy converters[C]// Proceedings of the EWEC'97. Dublin: [s. n.], 1997:579-582.
- [2] Caselitz P, Giebhardt J. Rotor condition monitoring for improved operational safety of offshore wind energy converters[J]. Journal of Solar Energy Engineering, 2005,127(2):253-261.
- [3] Jiang Dongxiang. Theoretical and experimental study on wind wheel unbalance for a wind turbine[C]// 2009 World Non-Grid-Connected Wind Power and Energy Conference. Nanjing, China: IEEE, 2009:1-5.
- [4] Niebsch J, Ramlau R, Nguyen T T. Mass and aerodynamic imbalance estimates of wind turbines[J]. Energies, 2010,3(4):696-710.
- [5] Gong Xiang, Qiao Wei. Simulation investigation of wind turbine imbalance faults[C]// 2010 International Conference on Power System Technology (POWERCON). Hangzhou, China: IEEE Computer Society,

2010:17-22.

- [6] Gardels D J, Wei Qiao, Xiang Gong. Simulation studies on imbalance faults of wind turbines[C]// 2010 IEEE Power and Energy Society General Meeting. Minneapolis, US: IEEE, 2010:1-5.
- [7] 李东东,陈陈. 风力发电系统动态仿真的风速模型[J]. 中国电机工程学报, 2005,25(21):41-44.
Li Dongdong, Chen Chen. Wind speed model for dynamic simulation of wind power generation system[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(21): 41-44. (in Chinese)
- [8] 曹娜,赵海翔,任普春,等. 风电场动态分析中风速模型的建立及应用[J]. 中国电机工程学报, 2007,27(36): 68-72.
Cao Na, Zhao Haixiang, Ren Puchun, et al. Establish and application of wind speed model in wind farm dynamic analysis[J]. Proceedings of the CSEE, 2007,27(36):68-72. (in Chinese)
- [9] Moriarty P J, Hansen A C. Aerodyn theory manua [M]. Golden, US: National Renewable Energy Laboratory, 2005:16-21.
- [10] Clough R W, Penzien J. Dynamics of structures[M]. Berkeley, US: University of California, 2003: 220-265.
- [11] Florin Iov, Anca Daniela Hansen. Wind turbine blockset in matlab simulink[M]. Denmark: Aalborg University, 2004:56-68.



第一作者简介:冯永新,男,1968年7月生,博士、教授、高级工程师。主要研究方向为电力设备状态监测及故障诊断分析。曾发表《试验模态分析中抑制频率混叠的采样改进措施》(《汽轮机技术》2012年第54卷第2期)等论文。
E-mail: yongxingf@126.com

