

随机载荷激励下的风力发电机组首次穿越模型

苏柏松¹, 解大¹, 娄宇成¹, 杨敏霞¹, 王西田¹, 张延迟²

(1. 上海交通大学电气工程系, 上海 200240; 2. 上海电机学院电气工程系, 上海 200240)

摘要: 大型化和轻量化发展后的风力发电系统时变复杂度逐渐增大。同时, 风电机组所受载荷具有随机性, 导致各组件的长时间振动加剧, 进而出现严重损坏, 破坏系统的稳定性。通过综合风电机组机械传动模型、确定性载荷模型和随机载荷影响, 建立了随机载荷下的首次穿越模型。并结合风电机组的电气动态模型, 构建了统一的机电动态模型。采用拟不可积 Hamilton 随机平均法, 建立了相应的 Hamilton 函数和一维 Itô 扩散过程的随机模型, 为后续的风力发电机组稳定性和可靠性研究打下基础。以国产某 750 kW 机组为例建立了相应的统一的机电动态模型, 并通过 Matlab 仿真验证了随机载荷下风力发电机组的首次穿越现象。算例结果表明, 该模型具有较好的适用性和可操作性。

关键词: 风力发电; 随机载荷; 首次穿越; 随机平均法

First-passage model under the excitation of stochastic load of the wind turbine

SU Baisong¹, XIE Da¹, LOU Yucheng¹, YANG Minxia¹, WANG Xitian¹, ZHANG Yanchi²

(1. School of Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China; 2. School of Electrical Engineering, Shanghai Dianji University, Shanghai 200240, China)

Abstract: With wind turbine system developing larger and lighter, the dimensions of time-varying complexity gradually increase. Meanwhile, the wind turbine loads suffer randomness, which results in stronger prolonged vibration. And then the stability of wind turbine system is seriously damaged. By integrating wind turbine model, deterministic load model and the impact of stochastic load, this paper establishes first-passage model with stochastic load. And combined with the electrical dynamic model of wind turbine, a unified electromechanical dynamic model is built up. By using stochastic averaging method of quasi-non-integrable-Hamiltonian systems, it sets up relevant Hamilton function and the stochastic model of one-dimensional Itô diffusion process, which will lay a good foundation for following stability and reliability study. With an example of a domestic unit of 750 kW wind turbine, the corresponding unified electromechanical dynamic model is established. And the first-passage phenomenon is verified by a simulation in MATLAB. Simulation results show that the model has good applicability and operability.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51277119).

Key words: wind turbine system; stochastic load; first-passage; stochastic averaging method

中图分类号: TM619 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2015)02-0040-08

0 引言

风能作为可再生能源, 具有蕴量大、分布广和无污染的优势, 并逐渐成为全世界的研究热点^[1-2]。作为可再生能源产业的重要组成部分, 风力发电装机容量逐年增长^[3]。随着风电机组向大型化、轻量化方向发展, 其零部件的柔度不断加大, 同时也加剧了风力发电系统的时变复杂度。在实际风电场

中, 由于风能的随机性特点^[4], 风电机组所受载荷常常是随机变化的, 由载荷引发的机组零部件(主要是风机轴系传动系统)长时间振动加剧, 会导致零部件的严重疲劳损坏, 降低风力发电系统的稳定性, 增加系统维护成本。因此, 研究这些振动的特点及由此引起的风电机组的稳定性和可靠性问题具有重要的意义^[5-7]。然而, 目前还没有比较完备的模型来描述这一振动问题。

在实际应用中, 95%以上的水电机组发生的故障问题都是由齿轮箱的故障引起。而风电机组所受载荷常常具有随机性和复杂性, 这导致由此产生的

基金项目: 国家自然科学基金(51277119); 上海市教委项目(10YZ217)

机组振动具有随机性和非线性特点。因此, 有必要引入非线性随机动力学^[8]理论模型进行这方面的问题研究。在非线随机动力学中, 一个受随机外部激励作用的动力学系统, 其响应在相空间上发生随机扩散。当随机过程响应第一次离开某个安全域或允许域时, 就称对应系统发生了首次穿越^[9]。首次穿越就是其中的一种破坏模式。对于像风力发电机组这样的结构系统, 系统的状态停留在安全域内的概率就是可靠性, 系统状态首次越过安全域边界的时间就是寿命。由于首次穿越与可靠性密切相关, 因此, 研究首次穿越具有重要的理论与实际意义。

在理论分析中, 首次穿越是随机动力学的困难问题, 迄今只有当响应为扩散的Markov过程时才有严格的理论^[10]。同时, 工程实际中的振动系统状态方程一般均为多维度偏微分方程, 难以直接求解精确解。因此, 对于随机振动系统的首次穿越问题, 常常采用随机平均法将原系统的状态方程化为关于慢变过程的Itô随机微分方程^[11], 然后进行系统的稳定性和可靠性分析。近几年中, Zhu等^[8,12-14]应用拟Hamilton系统随机平均法研究了高斯白噪声及宽带白噪声激励下多自由度拟Hamilton系统的首次穿越问题。工程实践中, 已有学者利用这一方法进行了随机参激下飞机机翼^[11]和温度随机变化^[15]等不同领域的首次穿越问题研究。目前国内在风电机组的首次穿越问题的研究还处于起步阶段, 在风电机组的载荷研究也局限在确定性的载荷^[16]上, 还没有关于考虑了随机载荷的风电机组模型的文章发表。

针对上述问题, 本文将引入随机动力学体系的首次穿越理论, 结合风力发电机轴系三质量块模型, 建立载荷随机变化的风电机组首次穿越模型, 并以拟不可积Hamilton随机平均法为例, 建立相应的Hamilton函数和一维Itô扩散过程的随机模型, 为后续研究随机载荷对风电机组的稳定性和可靠性的影响打下基础。

1 风力发电机模型与确定性载荷模型

风电机组不管是在运行过程中还是停机时都承受着各种各样的载荷。风力发电机载荷关系到风力发电机的静强度和疲劳强度的分析, 是风力发电机设计和认证时的重要依据。

外来激励载荷主要通过改变叶片的扭矩和转动惯量对风电机组传动系统产生影响。因而需考虑建立风电机组机械传动系统模型和外加载荷模型。

1.1 风力发电机组机械传动模型

风电机组的机械传动系统由五部分组成: 叶片、

低速轴、齿轮箱、高速轴和发电机转子。考虑齿轮箱两侧转速不同, 建立三质量块模型^[17], 包括: 叶片、低速轴、高速轴, 如图1所示。

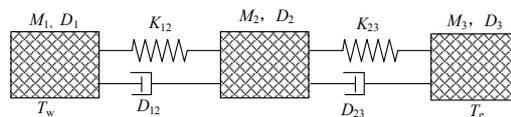


图1 风电机组轴系三质量块模型

Fig. 1 Three-mass shaft model of wind turbines

图1中: T_w 和 T_e 分别为叶片转矩和发电机电磁转矩, M_i 和 D_i 分别为质量块 i 的转动惯量和自阻尼系数; K_{ij} 和 D_{ij} 分别为质量块 i 和 j 之间的刚度系数和互阻尼系数。

低速轴和高速轴可以直接参考汽轮发电机组轴系的等效建模方法。由轴的结构尺寸和材料特性参数可以计算出等效质量块的转动惯量(M_2 、 M_3)和刚度系数(K_2 、 K_3)。不过对风机叶片等效转动惯量(M_1)和刚度系数(K_1), 目前还没有较为准确的实用计算方法。考虑到风机叶片的主模态固有频率 f_b 可以通过试验测定, 可采用以下等效参数计算方法。

1) 用有限单元法计算等效转动惯量为

$$M_1 = \sum_{i=1}^N m_i r_i^2 \quad (1)$$

式中: m_i 为沿径向划分的单元的质量; r_i 为单元至旋转中心的半径; N 为划分单元的数目。

2) 采用以下公式计算等效刚度系数为

$$K_1 = (2\pi f)^2 M_1 \quad (2)$$

一般来说, 用有限单元法计算的等效转动惯量 M_1 , 以及试验测定的主模态固有频率 f_b 都是比较准确的。因此采用上述方法得到的等效模型参数是比较准确可靠的。

得到风电机组轴系的1个等效质量块的转动惯量和刚度系数之后, 可以建立图1所示的模型。图中两质量块之间的连接刚度可由式(3)计算。

$$\begin{cases} \frac{1}{K_{12}} = \frac{1}{K_1} + \frac{1}{2K_2} \\ \frac{1}{K_{23}} = \frac{1}{K_3} + \frac{1}{2K_2} \end{cases} \quad (3)$$

根据图1所示的质量块—弹簧模型, 利用小扰动分析法, 得到模型的线性化方程如式(4)所示。

$$\begin{cases} \Delta \dot{\theta}_1 = \Delta \omega_1 \\ \Delta \dot{\theta}_2 = \Delta \omega_2 \\ \Delta \dot{\theta}_3 = \Delta \omega_3 \\ M_1 \Delta \dot{\omega}_1 = \Delta T_\omega - D_1 \Delta \omega_1 - D_{12} (\Delta \omega_1 - \Delta \omega_2) - \\ \quad K_{12} (\Delta \theta_1 - \Delta \theta_2) \\ M_2 \Delta \dot{\omega}_2 = -D_2 \Delta \omega_2 - D_{12} (\Delta \omega_2 - \Delta \omega_1) - \\ \quad D_{23} (\Delta \omega_2 - \Delta \omega_3) - K_{23} (\Delta \theta_2 - \Delta \theta_3) - \\ \quad K_{12} (\Delta \theta_2 - \Delta \theta_1) \\ M_3 \Delta \dot{\omega}_3 = -\Delta T_e - D_3 \Delta \omega_3 - D_{23} (\Delta \omega_3 - \Delta \omega_2) - \\ \quad K_{23} (\Delta \theta_3 - \Delta \theta_2) \end{cases} \quad (4)$$

式中, M_3 、 T_e 、 D_3 、 D_{23} 均为质块 3 由高速侧折算至低速侧以后的值, 传动比为 n_g 。

式(1)可以化为标准状态方程式如式(5)所示。

$$\dot{X}_{M1} = A_{M1} X_{M1} + B_{M1} u_{M1} \quad (5)$$

式中: $X_{M1} = [\Delta \theta_1, \Delta \theta_2, \Delta \theta_3, \Delta \omega_1, \Delta \omega_2, \Delta \omega_3]^T$; $u_{M1} = [\Delta T_\omega, \Delta T_e]^T$; 下标 M 表示机械部分。

1.2 风力发电机组电气动态模型

目前, 风电机组大致可以分为定桨恒频、变桨恒频和变速恒频三类。这里以典型的定桨恒频风电机组——双速发电机为例进行分析。双速异步发电机模型在三相对称的情况下, dq0 方程组为^[17]

$$\begin{cases} u_{ds} = X_{ss} \dot{i}_{ds} + X_m \dot{i}_{dr} + R_s i_{ds} - \\ \quad \omega_r X_{ss} i_{qs} - \omega_r X_m i_{qr} \\ u_{qs} = X_{ss} \dot{i}_{qs} + X_m \dot{i}_{qr} + R_s i_{qs} - \\ \quad \omega_r X_{ss} i_{ds} - \omega_r X_m i_{dr} \\ u_{dr} = X_m \dot{i}_{ds} + X_{rr} \dot{i}_{dr} + R_r i_{dr} \\ u_{qr} = X_m \dot{i}_{qs} + X_{rr} \dot{i}_{qr} + R_r i_{qr} \\ T_e = X_m (i_{qs} i_{dr} - i_{ds} i_{qr}) \\ M_3 \dot{\omega}_r = n_g^2 (T_e - T_m) \end{cases} \quad (6)$$

式中: u 为电压, i 为电流, 电压中, s 表示定子侧, r 表示转子侧, d 表示直轴, q 表示交轴; R_s 为发电机定子电阻; X_s 为发电机定子电抗; R_r 为发电机转子电阻; X_r 为发电机转子电抗; X_m 为发电机激磁电抗; $X_{ss} = X_s + X_m$, $X_{rr} = X_r + X_m$; ω_r 为转子电角速度; 其他参数与 1.1 节中定义一致。式(6)中 ω_r 和式(4)中的 ω_3 有如下关系: $\Delta \omega_r = n_p n_g \Delta \omega_3$, 其中, n_p 为发电极对数。

和机械部分建模过程一样, 式(6)经过变换和线性化可以解得异步发电机的状态空间方程。这里选取电流为状态变量, 使得整体的状态方程更加简洁

如式(7)所示。

$$\begin{cases} \Delta i_{ds} = \frac{X_s X_{rr}}{k X_m} \Delta i_{ds} - \frac{\omega_{r0} X_{ss} X_{rr}}{k X_m} \Delta i_{qs} + \\ \quad \left(\frac{X_{ss} X_{rr} R_r}{k X_m^2} - \frac{R_r}{X_m} \right) \Delta i_{dr} - \frac{\omega_{r0} X_{rr}}{k} \Delta i_{qr} - \frac{X_{rr}}{k X_m} \Delta \omega_1 + \\ \quad \left(\frac{X_s X_{rr}}{k X_m^2} + \frac{1}{X_m} \right) \Delta u_{qs} - \frac{X_{ss} X_{rr} i_{qs0} + X_{rr} X_m i_{qr0}}{k X_m} \Delta u_{qr} \\ \Delta i_{qs} = \frac{\omega_{r0} X_{ss} X_{rr}}{k X_m} \Delta i_{ds} + \frac{R_s X_{rr}}{k X_m} \Delta i_{qs} + \frac{\omega_{r0} X_{rr}}{k} \Delta i_{dr} - \\ \quad \frac{R_r X_{ss} X_{rr} + k R_r X_m}{k X_m^2} \Delta i_{qr} - \frac{X_{rr}}{k X_m} \Delta u_{ds} + \\ \quad \left(\frac{X_{ss} X_{rr}}{k X_m^2} + \frac{1}{X_m} \right) \Delta u_{dr} + \frac{X_{ss} X_{rr} i_{ds0} + X_{rr} X_m i_{dr0}}{k X_m} \Delta u_{qr} \\ \Delta i_{dr} = -\frac{R_s}{k} \Delta i_{ds} + \frac{\omega_{r0} X_m}{k} \Delta i_{qs} + \frac{R_r X_{ss}}{k X_m} \Delta i_{dr} + \frac{\omega_{r0} X_{rr}}{k} \Delta i_{qr} + \\ \quad \frac{1}{k} \Delta \omega_1 - \frac{X_{ss}}{k X_m} \Delta u_{qs} + \left(\frac{X_m i_{qs0}}{X_m} + \frac{X_{ss} i_{qr0}}{k X_m^2} \right) \Delta u_{qr} \\ \Delta i_{qr} = -\frac{\omega_{r0} X_{ss}}{k} \Delta i_{ds} - \frac{R_s}{k} \Delta i_{qs} - \frac{\omega_{r0} X_m}{k} \Delta i_{dr} + \frac{R_r X_{ss}}{k X_m} \Delta i_{qr} + \\ \quad \frac{1}{k} \Delta u_{ds} - \frac{X_{ss} i_{ds0} + X_m i_{dr0}}{k} \Delta u_{qr} \end{cases} \quad (7)$$

将风力发电机组电气动态模型写成矩阵形式为

$$\dot{X}_G = A_G X_G + B_G u_G \quad (8)$$

式中: $u_G = [\Delta \omega_1, \Delta u_{ds}, \Delta u_{qs}, \Delta u_{dr}, \Delta u_{qr}]^T$; $X_G = [\Delta i_{ds}, \Delta i_{qs}, \Delta i_{dr}, \Delta i_{qr}]^T$; 下标 G 表示发电机的各相参数。 ω_{r0} 为初始转速; i_{ds0} 、 i_{qs0} 、 i_{dr0} 、 i_{qr0} 分别为发电机相应的初始定子电流和转子电流分量; $k = X_m - X_{rr} X_{ss} / X_m$ 。

1.3 确定性载荷模型

作用在风力机上的载荷包括空气动力载荷、重力载荷、惯性载荷、操纵载荷和其他载荷等^[16]。

1) 空气动力载荷

作用在叶片上的空气动力载荷包括摆振方向弯矩 T_{xb} 、挥舞方向弯矩 T_{yb} 以及叶片俯仰力矩 T_{zb} 。响应的力矩方程为

$$T_{xb} = \frac{1}{2} \int_{r_0}^R \rho V_0^2 c C_n r dr \quad (9)$$

$$T_{yb} = \frac{1}{2} \int_{r_0}^R \rho V_0^2 c C_t r dr \quad (10)$$

$$dT_{zb} = \frac{1}{2} \rho V_0^2 c C_m dr \quad (11)$$

$$T_{zb} = \frac{1}{2} \int_{r_0}^R \{\rho V_0^2 c^2 [C_m + (C_l \cos \alpha + C_d \sin \alpha)(\bar{y}_z - 0.25)]\} dr \quad (12)$$

2) 重力载荷

叶片在转动过程中始终承受着重力的作用, 并且会随着方向角的不同而不同。可以基于叶素理论得到重力载荷的力矩方程为

$$T_{xg} = \int_0^R m_i(r)g \cdot r dr \quad (13)$$

3) 惯性载荷

叶片上的惯性载荷包括离心力载荷和科氏力载荷。其中, 叶片上的离心力产生的挥舞弯矩为

$$T_{yc} = \int_0^R \Delta l_i m_i \Omega^2 r dr \quad (14)$$

叶片上的科氏力产生的挥舞弯矩为

$$T_{yk} = 2\Omega \Lambda \cos \Psi \int_0^R m_i r^2 dr = 2\Omega \Lambda \cos \Psi I_b \quad (15)$$

4) 操纵载荷和其他载荷

风机的操纵载荷指的是风机操纵时, 对风机其他部件的附加载荷, 并且由该载荷诱导风机部件加速度响应产生的惯性载荷。该载荷主要是在风机气动刹车或者变桨距时产生。故其转矩方程可以表示成

$$T_{yo} = K_o(T_{yc} + T_{yk}) \quad (16)$$

式中, k_o 为载荷比例系数。

5) 其他载荷

其他载荷(主要包括波浪载荷和结冰载荷)的力矩, 由于相对前面几项载荷产生的力矩较小, 故在此处可忽略不计。

2 载荷随机变化的首次穿越模型

2.1 随机载荷下的首次穿越模型

由于目前还没有关于随机载荷下的首次穿越模型的文献发表。本文将在风力发电机组机械传动模型的基础上, 考虑确定性载荷和随机载荷对模型的影响后建立随机载荷下的首次穿越模型。一般来说, 外加载荷产生的力矩, 主要对三质量块模型的叶片参数的转动惯量 M_1 产生影响。其中, 在确定性载荷的作用下转动惯量增加量的函数关系可近似地表示为 $\Delta M_i = T_i \cdot \beta$, 其中 β 为比例系数。考虑载荷中的随机因素(以高斯白噪声为例), 即随机载荷的作用, 可认为 $M_1 = M_1 + W(t)$, 其中 $W(t)$ 为高斯白噪声, 其均值为 0, 强度为 $2D$ 。故计及载荷的随机因素后的风机叶片的等效转动惯量计算公式为

$$M_1' = M_1 + W(t) + \beta \cdot \sqrt{(T_{xb} + T_{xg})^2 + (T_{yb} + T_{yg} + T_{yk} + T_{yo})^2 + T_{zb}^2} \quad (17)$$

结合上述三质量块方程和载荷模型影响因子, 可建立机械系统的随机状态空间方程, 如式(18)所示。

$$\begin{cases} \Delta \dot{\theta}_1 = \Delta \omega_1 \\ \Delta \dot{\theta}_2 = \Delta \omega_2 \\ \Delta \dot{\theta}_3 = \Delta \omega_3 \\ \Delta \dot{\omega}_1 = \frac{1}{M_1} [\Delta T_w - D_1 \Delta \omega_1 - D_{12} (\Delta \omega_1 - \Delta \omega_2) - K_{12} (\Delta \theta_1 - \Delta \theta_2)] \\ \Delta \dot{\omega}_2 = \frac{1}{M_2} [-D_2 \Delta \omega_2 - D_{12} (\Delta \omega_2 - \Delta \omega_1) - D_{23} (\Delta \omega_2 - \Delta \omega_3) - K_{12} (\Delta \theta_2 - \Delta \theta_1)] \\ \Delta \dot{\omega}_3 = \frac{1}{M_3} [-\Delta T_e - D_3 \Delta \omega_3 - D_{23} (\Delta \omega_3 - \Delta \omega_2) - K_{23} (\Delta \theta_3 - \Delta \theta_2)] \end{cases} \quad (18)$$

将该随机状态空间方程写成矩阵形式得

$$\dot{X}_M = A_M X_M + B_M u_M \quad (19)$$

式中: $X_M = [\Delta \theta_1, \Delta \theta_2, \Delta \theta_3, \Delta \omega_1, \Delta \omega_2, \Delta \omega_3]^T$;

$$u_M = [\Delta T_w, \Delta T_e]^T$$

$$A_M = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ -\frac{K_{12}}{M_1'} & \frac{K_{12}}{M_1'} & 0 & -\frac{D_1 + D_2}{M_1'} & \frac{D_{12}}{M_1'} & 0 \\ \frac{K_{12}}{M_2} & -\frac{K_{12} + K_{23}}{M_2} & \frac{K_{23}}{M_2} & \frac{D_{12}}{M_2} & -\frac{D_3 + D_{12} + D_{23}}{M_2} & \frac{D_{23}}{M_2} \\ 0 & \frac{K_{23}}{M_3} & -\frac{K_{23}}{M_3} & 0 & \frac{D_{23}}{M_3} & -\frac{(D_{23} + D_3)}{M_3} \end{bmatrix};$$

$$B_M = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{M_3} \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{M_1} & 0 & 0 \end{bmatrix}^T$$

其中, 下标 M 表示机械部分。

2.2 统一的机电动态模型

将式(8)、式(19)联立, 将部分参数消去, 可写成一个统一的标准状态方程式如式(20)所示。

$$\dot{X} = AX + Bu \quad (20)$$

状态变量为 $X = [X_M, X_G]^T$ 。式(20)即为统一的机电模型。

对于其他类型风电机组只需对电气动态模型做适当修改即可获得相应的统一机电动态模型。

2.3 首次穿越模型的应用举例

首次穿越模型是随机动力学中的困难问题, 迄今只有当相应为扩散的 Markov 过程时才有严格的理论。并且, 一般通过随机平均法将复杂的求解偏

微分方程的问题转化为一阶扩散过程, 然后利用这一模型进行可靠性分析。目前, 这一研究方法已经具有比较完备的理论基础^[8-9], 且已用于解决工程问题^[11,15]。然而, 针对风力发电机组的首次穿越模型研究在国内还处于一片空白。因此, 建立基于风机发电机组及其载荷模型的首次穿越模型的随机状态空间方程具有重要的意义。建立随机状态空间方程后, 即可参照文献^[10-11]的方法将问题转化为扩散的 Markov 过程, 进而进行风力发电机组的稳定性和可靠性分析。这里, 为便于后续研究计及随机载荷的系统(如式(18)所示)的系统行为, 本文在此以拟不可积 Hamilton 随机平均法为例, 建立相应的 Hamilton 函数和一维 Itô 扩散过程的随机模型。

设式(18)的 Hamilton 函数(广义能量)为

$$H = \frac{1}{2}(\Delta\omega_1^2 + \Delta\omega_2^2 + \Delta\omega_3^2 + L_1^2\Delta\theta_1^2 + L_2^2\Delta\theta_2^2 + L_3^2\Delta\theta_3^2) \quad (21)$$

$$\text{式中: } L_1^2 = \left| \frac{K_{12}}{M'_1} \right|; L_2^2 = \left| \frac{K_{12}}{M'_1} \right|; L_3^2 = \left| \frac{D_{12}}{M'_1} \right|。$$

则式(13)可表示为 Itô 意义下的随机模型, 即

$$\begin{cases} d(\Delta\theta_i) = \frac{\partial H}{\partial \Delta\omega_i} dt \\ d(\Delta\omega_i) = -\left[\frac{\partial H}{\partial \Delta\theta_i} + m_{ij}(\Delta\theta, \Delta\omega) \frac{\partial H}{\partial \Delta\omega_i} \right] dt + \sigma_{ik}(\Delta\theta, \Delta\omega) \cdot dB_k(t) \end{cases} \quad (22)$$

根据拟不可积 Hamilton 系统^[4]的定义及性质, 可知式(18)系统依概率收敛到一维 Itô 扩散过程为

$$dH = m(H)dt + \sigma(H)dB(t) \quad (23)$$

式中: $B(t)$ 是标准 Weiner 过程; $m(H)$ 和 $\sigma(H)$ 分别是 Itô 随机过程的漂移系数与扩散系数。使用拟不可积 Hamilton 系统的随机平均法^[4], 得到

$$\begin{aligned} m(H) = & \frac{1}{T(H)} \int_{\Omega} [(-m_{11}\Delta\omega_1^2 - m_{12}\Delta\omega_1\Delta\omega_2 - m_{13}\Delta\omega_1\Delta\omega_3 - \\ & m_{21}\Delta\omega_2\Delta\omega_1 - m_{22}\Delta\omega_2^2 - m_{23}\Delta\omega_2\Delta\omega_3 - \\ & m_{31}\Delta\omega_3\Delta\omega_1 - m_{32}\Delta\omega_3\Delta\omega_2 - m_{33}\Delta\omega_3^2) + \\ & \frac{1}{2}(2Df_{11}^2/\Delta\omega_1)d\Delta\theta_1d\Delta\theta_2d\Delta\theta_3 \end{aligned} \quad (24)$$

$$\begin{aligned} \sigma^2(H) = & \frac{1}{T(H)} \int_{\Omega} [(2Df_{11}^2\Delta\omega_1 + 4Df_{11}f_{12}\Delta\omega_1\Delta\omega_2)/\Delta\omega_1] \cdot \\ & d\Delta\theta_1d\Delta\theta_2d\Delta\theta_3 \end{aligned} \quad (25)$$

式中:

$$\Omega = \{(\Delta\theta_1, \Delta\theta_2, \Delta\theta_3) | H(\Delta\theta_1, \Delta\theta_2, \Delta\theta_3, 0, \Delta\omega_2, \Delta\omega_3) \leq H\}$$

$$T(H) = \int_{\Omega} \left(\frac{1}{\Delta\omega_1} \right) d\Delta\theta_1 d\Delta\theta_2 d\Delta\theta_3 d\Delta\omega_2 d\Delta\omega_3 = \frac{3\pi^3 H}{L_1 L_2 L_3}$$

$$m_{11} = \frac{1}{M'_1} (-D_1 - D_{12} - K_{12} \frac{\Delta\theta_1}{\Delta\omega_1})$$

$$m_{12} = -\frac{1}{M'_1} (D_{12} + K_{12} \frac{\Delta\theta_2}{\Delta\omega_2})$$

$$m_{22} = \frac{1}{M_2} (-D_2 - D_{12} - D_{23} - K_{12} \frac{\Delta\theta_2}{\Delta\omega_2})$$

$$m_{21} = -\frac{1}{M_2} (D_{12} + K_{12} \frac{\Delta\theta_1}{\Delta\omega_1})$$

$$m_{23} = -\frac{1}{M_2} (D_{23} + K_{23} \frac{\Delta\theta_3}{\Delta\omega_3})$$

$$m_{32} = -\frac{1}{M_3} (D_{23} + K_{23} \frac{\Delta\theta_2}{\Delta\omega_2})$$

$$m_{33} = \frac{1}{M_3} (-D_3 - D_{23} - K_{23} \frac{\Delta\theta_3}{\Delta\omega_3})$$

$$m_{13} = m_{31} = 0$$

$$f_{11} = -K_{12}\Delta\theta_1 \quad f_{12} = K_{12}\Delta\theta_2$$

$$f_{13} = f_{21} = f_{22} = f_{23} = f_{31} = f_{32} = f_{33} = 0$$

3 算例分析

3.1 机组参数及载荷数据

针对国产 750 kW 机组的实际参数进行计算, 可以得到如表 1 和表 2 所示的参数列表。仿真中可以忽略互阻尼的作用, 并将所有参数折算至低速侧, 传动比 $n_g = 75$ 。

风力发电机组的载荷值一般通过专用仿真软件仿真计算得出, 或者通过一系列传感器测量得到。文献^[16]中提供了 1.0 MW 的发电机组载荷仿真计算值。为验证首次穿越模型的有效性, 不妨参考 1.0

表 1 风力机组机械部分参数表

Table 1 Symbols used for mechanic parameters

参数	数值	参数	数值
M_1	1 265 625 kg·m ²	D_1	0.01 N·m/rad
M_2	8 863 kg·m ²	D_2	0.008 N·m/rad
M_3	33 796 kg·m ²	D_3	0.008 N·m/rad
K_{12}	6.77×10 ⁷ N·m/rad	D_{12}	0.001 N·m/rad
K_{23}	1.17×10 ⁷ N·m/rad	D_{23}	0.001 N·m/rad

表2 风力机组电气部分参数表

序号	数值/ Ω
定子电阻 R_s	0.011 60
定子漏电抗 X_s	0.053 66
激磁电抗 X_m	0.338 70
转子电阻 R_r	0.016 90
转子漏抗 X_r	0.050 92

表3 三质量块模型特征根

序号	数值
特征根 1	$-5.63882330218505 \times 10^{-7} + 95.1653191968677j$
特征根 2	$-5.63882330218505 \times 10^{-7} - 95.1653191968677j$
特征根 3	$-1.27805871738966 \times 10^{-7} + 17.3723667139040j$
特征根 4	$-1.27805871738966 \times 10^{-7} - 17.3723667139040j$
特征根 5	$-9.93664969333014 \times 10^{-9} + 1.23600104204045 \times 10^{-7}j$
特征根 6	$-9.93664969333014 \times 10^{-9} - 1.23600104204045 \times 10^{-7}j$
特征根 7	$-0.282583935259602 + 19.9988925873216j$
特征根 8	$-0.282583935259602 - 19.9988925873216j$
特征根 9	$-0.173784579587008 + 0.000000000000000j$
特征根 10	$-0.275063417727769 + 0.000000000000000j$

MW 发电机的载荷数据, 给出 750 kW 发电机组的载荷数据如下:

$$\Sigma M_x = T_{xb} + T_{xg} = 3.6 \times 10^5 \text{ N} \cdot \text{m}$$

$$\Sigma M_y = T_{yb} + T_{yg} + T_{yk} + T_{y0} = 4.0 \times 10^4 \text{ N} \cdot \text{m}$$

$$\Sigma M_z \approx 0 \quad (\Sigma M_z \ll \Sigma M_x, \Sigma M_z \ll \Sigma M_y)$$

3.2 算例计算

此处取外加载荷力矩与转动惯量的比例系数 $\beta = 0.01$, 随机载荷(高斯白噪声)的强度 $2D=2 \times 10^5$ 。由等效转动惯量式(12)得, $M_1' = 7.156 \times 10^5 \text{ N} \cdot \text{m} + W(t)$ 如图 2 所示。

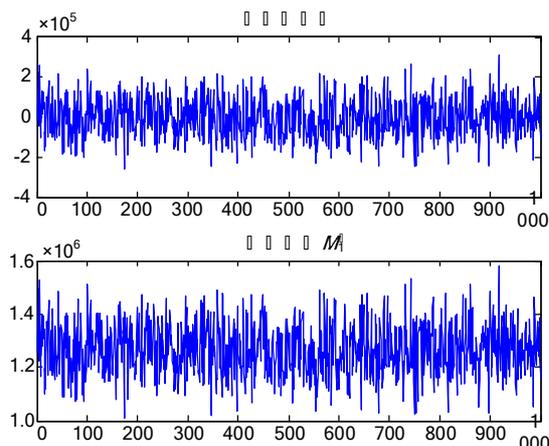


图 2 计入随机载荷后的转动惯量 M_1'

Fig. 2 Rotational inertia M_1' with stochastic load

然后, 即可按照式(20)所示的统一机电动态模型进行系统特性仿真分析。

(1) 当不考虑确定性载荷和随机载荷的作用时, 系统的特征根如表 3 所示。

不考虑外加载荷的作用时, 风力发电机组统一机电动态模型所有特征根都处于左半平面, 系统是稳定的。

(2) 当只考虑确定性载荷的作用时, 系统的特征值如表 4 所示。

表 4 加入确定性载荷的系统特征根

Table 4 Eigenvalues of the model with deterministic load

序号	数值
特征根 1	$-5.63888330998311 \times 10^{-7} + 95.1646421584165j$
特征根 2	$-5.63888330998311 \times 10^{-7} - 95.1646421584165j$
特征根 3	$-1.27814893977781 \times 10^{-7} + 17.3716819363106j$
特征根 4	$-1.27814893977781 \times 10^{-7} - 17.3716819363106j$
特征根 5	$-9.90921518785345 \times 10^{-9} + 3.66135258075970 \times 10^{-8}j$
特征根 6	$-9.90921518785345 \times 10^{-9} - 3.66135258075970 \times 10^{-8}j$
特征根 7	$-0.282583935259602 + 19.9988925873216j$
特征根 8	$-0.282583935259602 - 19.9988925873216j$
特征根 9	$-0.173784579587008 + 0.000000000000000j$
特征根 10	$-0.275063417727769 + 0.000000000000000j$

(3) 当计入随机载荷(高斯白噪声)和确定性载荷的作用时, 系统的特征根轨迹如图 3 所示。

计入随机载荷后, 系统的特征根 5、6 的轨迹出现在了右平面, 出现了首次穿越问题。由于载荷具有随机性, 所以计入随机载荷的首次穿越模型的特征根轨迹也具有一定的随机性。因此, 要研究风力发电系统首次穿越问题相关的系统稳定性和可靠性还需要按照式(21)~式(25), 利用拟 Hamilton 系统随机平均法进行分析。

只考虑确定性载荷的作用时, 风力发电机组统一机电动态模型所有特征根也都处于左半平面, 系统是稳定的。

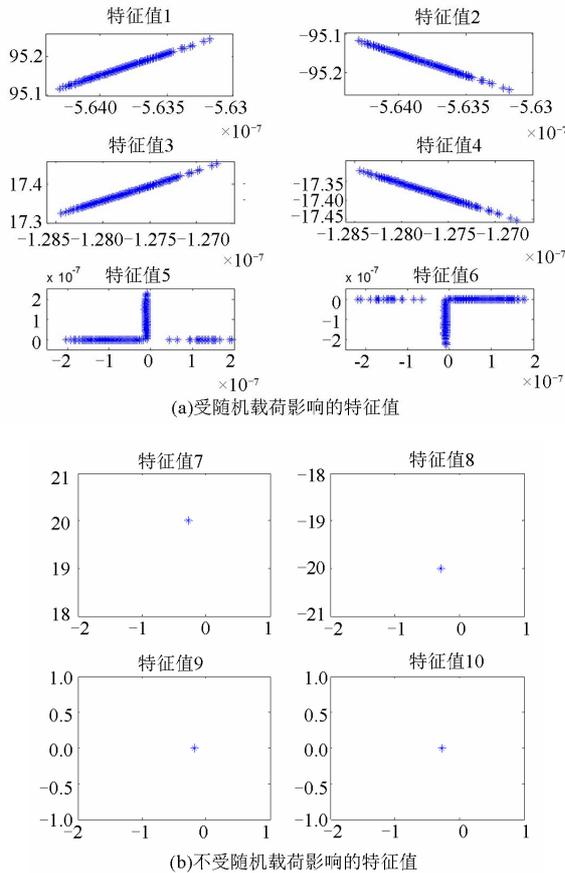


图 3 计入随机载荷后的特征根轨迹

Fig. 3 Root locus with stochastic load

4 结论

本文综合风力发电机组机械传动模型和确定性载荷模型，并计及随机载荷(高斯白噪声为例)建立了随机二阶三维状态空间方程，形成了随机载荷下的首次穿越模型。在此基础上，结合典型定桨恒频风电机组电气动态模型，构建了统一机电动态模型，考虑了电气量对模型稳定性的影响。并以拟不可积 Hamilton 系统随机平均法为例，创建相应的广义能量函数(Hamilton 函数)及一维 Itô 扩散过程模型，为后续的基于随机载荷下首次穿越模型的风力发电系统稳定性和可靠性研究打下基础。然后，通过算例分析计算，建立了国产 750 kW 机组的在随机载荷下的统一机电动态模型，并利用特征根轨迹的方法进行了系统稳定性分析。算例表明，在随机载荷作用下，风力发电机组确实存在首次穿越问题。根据本文建立的随机载荷下的首次穿越模型，将很容易建立不同类型风力发电机组相应首次穿越模型。在此基础上可进行后续的系统稳定性和可靠性分析。

本文将随机非线性动力学体系的首次穿越理论引入风力发电机组。建立了计及随机载荷的风力发电机组首次穿越模型，为后续研究风力发电机组关于首次穿越问题的稳定性和可靠性提供了基础。

参考文献

[1] 施凯, 黄文新, 胡育文, 等. 宽风速运行的定子双绕组感应电机风力发电系统拓扑及控制策略[J]. 电工技术学报, 2012, 27(7): 78-85.
SHI Kai, HUANG Wenxin, HU Yuwen, et al. Topology and control strategies of dual stator-winding induction generator wind power system over a wide wind speed range[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(7): 78-85.

[2] 施凯, 黄文新, 胡育文, 等. 宽风速运行的定子双绕组感应电机风力发电系统励磁电容的优化方案[J]. 电工技术学报, 2012, 27(7): 86-93.
SHI Kai, HUANG Wenxin, HU Yuwen, et al. Optimal scheme of excitation capacitor for dual stator-winding induction generator wind power system over a wide wind speed[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(7): 86-93.

[3] 张禄, 金新民, 战亮宇, 等. 电网电压对称跌落下的双馈感应风力发电机磁链有源衰减控制[J]. 电工技术学报, 2012, 27(9): 191-197.
ZHANG Lu, JIN Xinmin, ZHAN Liangyu, et al. Flux active damping control of the doubly fed induction generator under grid voltage symmetrical dip[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(9): 191-197.

[4] 马瑞, 康仁, 姜飞, 等. 考虑风电随机模糊不确定性的电力系统多目标调度计划研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(1): 150-156.
MA Rui, KANG Ren, JIANG Fei, et al. Multi-objective dispatch planning of power system considering the stochastic and fuzzy wind power[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(1): 150-156.

[5] 郝正航, 余贻鑫. 双馈风力发电机组对电力系统稳定性影响[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(3): 7-11.
HAO Zhenghang, YU Yixin. The influence of doubly-fed induction generator on stability of power system[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(3): 7-11.

[6] 郝正航, 余贻鑫. 双馈风电机组机电耦合与轴系稳定的分析与辨识[J]. 电工技术学报, 2011, 26(3): 134-139.
HAO Zhenghang, YU Yixin. Analysis and identification for electromechanical coupling and shaft stability of

- doubly-fed induction generator[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(3): 134-139.
- [7] 刘阳, 刘俊勇, 张思明, 等. 考虑动态风电模型极限诱导分岔研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(18): 116-121.
LIU Yang, LIU Junyong, ZHANG Siming, et al. The research of limit induced bifurcation in dynamic model of wind power system[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(18): 116-121.
- [8] 朱位秋, 黄志龙, 应祖光. 非线性随机动力学与控制的哈密顿理论框架[J]. 力学与实践, 2002, 24(3): 1-7.
ZHU Weiqiu, HUANG Zhilong, YING Zuguang. Hamiltonian framework of nonlinear stochastic dynamics and control[J]. Mechanics and Practice, 2002, 24(3): 1-7.
- [9] 张雷. 多自由度随机振动系统的首次穿越问题[D]. 上海: 上海交通大学, 2013.
ZHANG Lei. First-passage problem of random vibration systems with multi-degrees-of-freedom[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2013.
- [10] 张雷, 吴勇军. 五自由度强非线性随机振动系统的首次穿越研究[J]. 振动与冲击, 2012, 31(12): 1-4.
ZHANG Lei, WU Yongjun. First-passage of a 5-DOF strongly nonlinear random vibration system[J]. Journal of vibration and shock, 2012, 31(12): 1-4.
- [11] 谭建国, 王洪礼, 葛根, 等. 二元机翼模型在随机参数激励下的首次穿越问题[J]. 天津大学学报, 2009, 42(7): 581-585.
TAN Jianguo, WANG Hongli, GE Gen, et al. First passage of a two-dimensional airfoil model subject to stochastic parametric excitation[J]. Journal of Tianjin University, 2009, 42(7): 581-585.
- [12] ZHU W Q, YANG Y Q. Stochastic averaging of quasi-nonintegrable-Hamiltonian systems[J]. Journal of applied mechanics, 1997, 64(1): 157-164.
- [13] ZHU W Q, HUANG Z L. Stochastic stability of quasi-non-integrable-Hamiltonian systems[J]. Journal of Sound and Vibration, 1998, 218(5): 769-789.
- [14] 朱位秋. 非线性随机动力学与控制[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- [15] 胡亚才, 范利武, 田甜, 等. 工程中温度随机变化的首次穿越模型[J]. 浙江大学学报: 工学版, 2006, 40(10): 1811-1814.
HU Yacai, FAN Liwu, TIAN Tian, et al. First passage model for stochastic temperature variation in engineering [J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science, 2006, 40(10): 1811-1814.
- [16] 杨娜. 风力发电机组载荷建模与控制[D]. 北京: 华北电力大学, 2012.
YANG Na. Load modeling and control of wind turbines [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2012.
- [17] 王瑞琳, 解大, 王西田, 等. 定桨恒频风电机组机网扭振的建模与机理[J]. 电力自动化设备, 2010, 38(3): 20-24.
WANG Ruilin, XIE Da, WANG Xitian, et al. Modeling and mechanism of torsional vibration of grid-connected wind generator[J]. Electric Power Automation Equipment, 2010, 38(3): 20-24.

收稿日期: 2014-04-18; 修回日期: 2014-07-25

作者简介:

苏柏松(1988-), 男, 硕士研究生, 从事风机机网扭振作用研究; E-mail: subaisong2012@sina.com

解大(1969-), 男, 博士, 副教授, 从事电力系统分析、灵活交流输电设备、新能源研究;

娄宇成(1990-), 女, 硕士研究生, 从事风机机网扭振作用研究。