

风电机组轴系的剩余寿命预估

赵洪山, 李自立

(华北电力大学 电气与电子工程学院, 河北 保定 071003)

摘要:风电机组轴系作为传动系统的关键部件,其剩余寿命的准确预估有利于维修方案的优化,从而有效降低运行成本。提出了一种风电机组轴系的退化-扭振耦合模型,结合了慢速的退化过程和快速的转动行为,同时引入不确定量风速对轴系退化的影响。运用四阶龙格-库塔算法和雨流统计法,通过多次蒙特卡罗模拟得到退化度曲线,进一步求得剩余寿命的期望和方差。结果表明,风电机组轴系的退化度呈指数发展,剩余寿命的期望和方差随退化度呈负指数变化。

关键词:风电机组;轴系;退化;剩余寿命;蒙特卡罗模拟;雨流统计法

中图分类号:TM 614;TM 921.2

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202006001

0 引言

风电机组运行环境恶劣,故障频发,维修费用约占风电机组总成本的30%^[1]。风电机组轴系作为传动系统的重要组成部分,长期大负荷运行容易受损,导致故障率较高,是维修的重点对象。如果能够准确估计风电机组轴系的退化状况和预测故障的发生时刻,有益于实现优化维修,进而降低风电机组的运行成本。因此研究风电机组轴系的退化过程和剩余寿命具有重要意义。

目前对于机械设备剩余寿命的预估方法主要分为基于数据驱动的方法和基于物理模型的方法两大类。目前基于数据驱动的方法主要为人工智能算法^[2],其优点为避免建立复杂的实际模型,缺点为需要大量的数据支撑,对数据的质量也有要求。文献[3]对实验平台的振动信号提取趋势性性能退化特征,建立了风电机组齿轮箱剩余寿命预测的支持向量机模型。提出了基于主成分分析的数据降维方法,将降维融合后的数据输入支持向量机中,用于预测剩余寿命。文献[4]在温度特性参数的基础上,结合Wiener过程提出了一种性能退化过程,在逆高斯分布基础上建立预测模型,以确定风电机组轴承的实时剩余寿命预估。基于物理模型的方法主要是基于设备的受力和材料的物理特性,从疲劳损伤断裂机理的角度进行寿命预估^[5],优点是依赖的数据较少,缺点是建立精确实际模型难度较大。文献[6]应用有限元法在轴向力和径向力作用下对主轴轴承进行接触分析应力,根据主轴轴承的应力-寿命曲线和线性累积损伤理论预测风电机组主轴轴承的疲劳寿命。文献[7]通过BLADED软件分析出60 s载荷图并绘

制出风力机主轴载荷谱,由载荷谱计算出轴承寿命。

然而,目前对风电机组轴系剩余寿命预估的研究较少,现有的文献主要从轴系的扭振特性和疲劳可靠性的角度进行分析。文献[8]基于双馈风力发电机组轴系扭振造成轴系零件疲劳损伤的机理,建立了多晶体结构金属材料模型并分析了双馈风力发电机组轴系齿轮材料在轴系扭振作用下的疲劳破坏过程。文献[9]基于非线性接触理论对风力发电机主轴静强度进行了分析研究,应用多轴疲劳理论校核了主轴的疲劳寿命并研究讨论了轴承弹性支撑对主轴模态的影响。

风电机组作为风力驱动的旋转设备,如何在轴系退化模型中计及变化较大的风速的影响,成为预测剩余寿命准确性的重要影响因素。本文基于裂纹扩展得到退化过程,根据风电机组轴系三质量块模型推导出动态方程,并由刚度退化和应力响应方程耦合风电机组轴系退化过程和扭转行为。然后,将服从两参数威布尔分布的风速引入耦合模型,利用龙格-库塔和雨流统计算法对模型进行求解。最后,通过多次的蒙特卡罗模拟得出风电机组轴系的退化度曲线,从而计算得到相应时刻剩余寿命的期望和方差。

1 风电机组轴系退化-扭振耦合模型

1.1 基于裂纹扩展的风电机组轴系退化模型

风电机组轴系主要由叶轮、低速转动轴、齿轮箱、高速转动轴和发电机组成。其中两转动轴作为连接部件更容易受到轴系两端不平衡扭转力矩的影响导致损伤,故本节研究两转动轴的退化模型。

从随机疲劳的角度来看,损伤变量与裂纹扩展呈相关关系,其值等于裂纹大小。Paris-Erdogan定律是一种广泛应用的裂纹扩展模型^[10],如式(1)所示。

$$d\delta/dt = C(\Delta K)^\gamma \quad (1)$$

收稿日期:2019-08-27;修回日期:2020-04-03

基金项目:国家科技支撑计划项目(2015BAA06B03)

Project supported by the National Key Technology Support Program of China(2015BAA06B03)

其中, $d\delta/dt$ 为 γ 裂纹的扩展速度, δ 为裂纹长度, t 为时间变量; C 和 γ 为材料常数; ΔK 为应力强度因子。 ΔK 可表示为:

$$\Delta K = Y(\delta) \Delta s \sqrt{\pi \delta} \quad (2)$$

其中, $Y(\delta)$ 为裂纹几何形状函数; Δs 为应力幅值, 在风电机组轴系模型中表示扭振的应力响应。将式(2)代入式(1), 可得:

$$d\delta/dt = \varepsilon \phi_1(\delta) \phi_2(p) \quad (3)$$

其中, $\varepsilon = C$; $\phi_1(\delta) = (Y(\delta) \sqrt{\pi \delta})^\gamma$; $\phi_2(p) = p^\gamma$, $p = \Delta s$ 。假定初始的裂纹长度为 δ_0 , 失效时的裂纹长度为 δ_M 。利用欧拉法将式(3)进行离散化, 可得:

$$\delta_i = \delta_{i-\Delta t} + \varepsilon \phi_1(\delta_{i-\Delta t}) \phi_2(p_i) \quad (4)$$

其中, Δt 为时间间隔; p_i 为 t 时刻下的应力幅值。

由于裂纹长度 δ 在数值上可取任意值, 为了便于分析, 将裂纹长度 $\delta \in [\delta_0, \delta_M]$ 表示成退化度 $\xi \in [0, 1]$, 当退化度达到 1 时, 表示系统退化完全或损坏。根据 Palmgren-Miner 规则^[11], 在任意应力幅值下损伤增量与出现故障时总的损伤增量之比为损伤百分比 $\Delta_{k\Delta t}$, 则 $t(t = n\Delta t)$ 时刻的累积退化度 ξ_t 为:

$$\xi_t = \sum_{k=1}^n \Delta_{k\Delta t} = \frac{\sum_{k=1}^n \Delta \delta_{k\Delta t}}{\delta_M - \delta_0} = \frac{\delta_t - \delta_0}{\delta_M - \delta_0} \quad (5)$$

其中, $\Delta \delta_{k\Delta t} = \delta_{k\Delta t} - \delta_{(k-1)\Delta t}$ 为裂纹长度增量。

由式(4)和式(5)可得:

$$\xi_t - \xi_{t-\Delta t} = \frac{\delta_t - \delta_{t-\Delta t}}{\delta_M - \delta_0} = \frac{\varepsilon}{\delta_M - \delta_0} \phi_1(\delta_{t-\Delta t}) \phi_2(p_t) = \frac{\varepsilon}{\delta_M - \delta_0} \phi_1((\delta_M - \delta_0)\xi_{t-\Delta t} + \delta_0) \phi_2(p_t) \quad (6)$$

令 $\eta = \varepsilon / (\delta_M - \delta_0)$, 由式(6)可知, 等式右边只有 $\xi_{t-\Delta t}$ 和 p_t 为变量, 为了表示方便, 式(6)可以写为:

$$\xi_t = \xi_{t-\Delta t} + \eta \phi_1(\xi_{t-\Delta t}) \phi_2(p_t) \quad (7)$$

由式(7)可知, t 时刻的退化度 ξ_t 只取决于此时时刻的应力响应和前一时刻的退化度, 则退化计算可视为在应力幅值 p_t 影响下不断迭代的过程。

1.2 风电机组轴系三质量块模型

风电机组作为一个动态的旋转机械, 运动行为会造成应力响应的变化, 故需要考虑风电机组轴系转动对退化的影响。将风电机组轴系的叶轮、低速转动轴、齿轮箱、高速转动轴和发电机 5 个主要部件简化为 3 个质量块和 2 个弹簧模型, 分别为叶轮质量块、齿轮箱质量块和发电机转子质量块, 其中风轮机质量块和齿轮箱质量块由低速转动轴连接, 齿轮箱质量块和发电机转子质量块由高速转动轴连接。在简化模型中认为, 轴只有刚度没有转动惯量, 质量块只有转动惯量没有刚度, 等效示意图如图 1 所示。

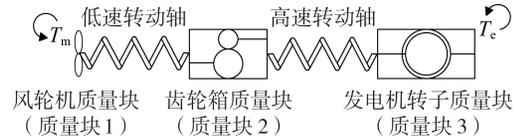


图1 风电机组轴系示意图

Fig.1 Schematic diagram of wind turbine unit shaft

运动方程为^[12]:

$$\begin{cases} J_1 \ddot{\theta}_1 = T_m - D_{12}(\dot{\theta}_1 - \dot{\theta}_2) - K_{12}(\theta_1 - \theta_2) - D_1 \dot{\theta}_1 \\ J_2 \ddot{\theta}_2 = D_{12}(\dot{\theta}_1 - \dot{\theta}_2) + K_{12}(\theta_1 - \theta_2) - D_{23}(\dot{\theta}_2 - \dot{\theta}_3) - K_{23}(\theta_2 - \theta_3) - D_2 \dot{\theta}_2 \\ J_3 \ddot{\theta}_3 = D_{23}(\dot{\theta}_2 - \dot{\theta}_3) + K_{23}(\theta_2 - \theta_3) - T_e - D_3 \dot{\theta}_3 \end{cases} \quad (8)$$

其中, θ 为扭转角位移; J_1 — J_3 分别为质量块 1—3 的转动惯量; D_1 — D_3 分别为质量块 1—3 的自阻尼; D_{12} 、 D_{23} 分别为质量块 1 和 2、质量块 2 和 3 间的互阻尼; K_{12} 、 K_{23} 分别为质量块 1 和 2、质量块 2 和 3 之间的刚度, 即低速转动轴和高速转动轴的刚度; T_m 为机械转矩; T_e 为电磁转矩。

由于齿轮箱的存在, 齿轮箱两侧的转速并不一致, 需要将高速侧的量折算到低速侧。假设 n_r 为齿轮箱的转速比, J'_3 、 T'_e 、 D'_3 、 D'_{23} 为质量块 3 未折算前的物理量。对于转动惯量、阻尼系数、转矩, 需要分别保证折算前后质量块的动能、能量损耗、功率保持不变。折算前后的关系式为:

$$\begin{cases} J_3 = J'_3 n_r^2 \\ T_e = T'_e n_r \\ D_3 = D'_3 n_r^2 \\ D_{23} = D'_{23} n_r^2 \end{cases} \quad (9)$$

式(8)可写成矩阵的形式为:

$$\mathbf{J}\ddot{\boldsymbol{\theta}} + \mathbf{D}\dot{\boldsymbol{\theta}} + \mathbf{K}\boldsymbol{\theta} = \mathbf{T}_m - \mathbf{T}_e \quad (10)$$

其中, \mathbf{J} 、 \mathbf{D} 和 \mathbf{K} 分别为转动惯量、阻尼和刚度矩阵; \mathbf{T}_m 、 \mathbf{T}_e 分别为机械转矩、电磁转矩矩阵。 \mathbf{T}_e 由风电机组电气部分的参量决定, 根据空气动力学模型^[13]和威布尔风速分布模型^[14]可以得到 \mathbf{T}_m 。 \mathbf{T}_e 和 \mathbf{T}_m 的具体推导见附录 A。

1.3 退化模型和质量块模型间的耦合

在轴系模型的扭振过程中, 动态的旋转行为会导致转轴裂纹的产生及扩展的退化行为, 根据材料力学原理, 轴的应力幅值 p_t 受到相邻两质量块扭转角度差值 $\Delta\theta$ 的影响^[15], 即:

$$p_t = G r \Delta\theta \quad (11)$$

其中, G 为转轴的弹性模量; r 为转轴的半径。

文献[16]研究的是旋转机械转轴在转动过程中裂纹长度缓慢扩展产生的刚度慢变, 该分析适用于上述风电机组轴系模型的刚度变化, 转轴刚度的变化解析式为:

$$\frac{K(\alpha, \varphi)}{K_0} = \begin{cases} 1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{\sin(4\alpha)}{4\pi} & \varphi \in \left[-\frac{\pi}{2} + \alpha, \frac{\pi}{2} - \alpha \right) \\ \frac{3}{4} - \frac{\alpha}{2\pi} + \frac{\sin(4\alpha)}{8\pi} + \frac{\varphi}{2\pi} - \frac{\sin(4\varphi)}{8\pi} + \frac{\cot \varphi}{\pi} (\cos^4 \alpha - \sin^4 \varphi) & \varphi \in \left[\frac{\pi}{2} - \alpha, \frac{\pi}{2} + \alpha \right) \\ 1 & \varphi \in \left[\frac{\pi}{2} + \alpha, \frac{3\pi}{2} - \alpha \right) \\ \frac{7}{4} - \frac{\alpha}{2\pi} + \frac{\sin(4\alpha)}{8\pi} - \frac{\varphi}{2\pi} + \frac{\sin(4\varphi)}{8\pi} - \frac{\cot \varphi}{\pi} (\cos^4 \alpha - \sin^4 \varphi) & \varphi \in \left[\frac{3\pi}{2} - \alpha, \frac{3\pi}{2} + \alpha \right) \end{cases} \quad (12)$$

其中, K_0 为轴系未退化前的刚度值; α 为裂纹圆周角, $\alpha = \arccos(1 - 0.5\delta/r)$; φ 为转轴涡动角度差, 由于转轴轴心是静止的, 故 φ 表征转轴转过的角度。式(12)给出了转轴刚度 K 和裂纹长度 δ 的关系式, 结合式(5)可以得到转轴刚度和退化度的关系式 $K(\xi)$ 。

综上所述, 风电机组轴系模型的退化-扭振模型为:

$$\begin{cases} \xi_t = \xi_{t-\Delta t} + \eta \phi'_1(\xi_{t-\Delta t}) \phi_2(p_t) \\ J\ddot{\theta} + D\dot{\theta} + K(\xi)\theta = T_m - T_e \end{cases} \quad (13)$$

式(13)分别表示扭转角位移随时间变化的快速动态行为以及退化度随时间变化的缓慢动态行为。缓慢行为受到应力幅值 p_t 影响, p_t 受到快速动态行为中扭转角位移 θ 的影响; 而快速动态行为中的刚度受到缓慢行为中裂纹长度 δ 的影响, 式(11)和式(12)构成了2个行为过程之间的联系, 2个行为过程严密耦合。从演变的时间角度而言, 耦合模型也是双时间尺度模型。

风电机组的轴系是在机械转矩和电磁转矩的共同作用下旋转起来的, 机械转矩受风速影响, 电磁转矩受输出功率的影响。在风电机组并网运行的情况下, 通过各种控制手段, 可以减缓输出功率的波动, 使之远小于风速的变化。为了简化模型计算, 假设风电机组的输出功率不变, 即电磁转矩不变, 仅在变化的机械转矩作用下发生退化。

2 模型求解

四阶龙格-库塔算法是一种求解常系数微分方程数值解的经典算法, 其精度高, 计算量适中, 为求解退化度随时间变化的缓慢动态行为的微分方程组。

由于转轴退化度的演变是一个缓慢变化的过程, 而由式(13)可以看出退化度的变化量只和应力响应幅值有关, 应力响应幅值受相邻质量块扭转角

度差的影响, 随时间而变化。因此需要对轴系的应力时间历程进行适当的统计和处理。雨流统计法作为最常用的周期计数法, 广泛应用于工程上的疲劳寿命计算。

雨流统计法的主要功能是将实测载荷历程简化为若干个载荷循环, 供疲劳寿命估算和编制疲劳试验载荷谱使用^[17]。雨流统计法建立在封闭的应力-应变迟滞回线逐个计数的基础上, 能将应力迟滞回线逐个分解, 统计应力时间历程中的循环和半循环。经过雨流统计法处理后, 能够计算每个循环(或半循环)的退化度, 而整个过程的总退化度等于这些退化度结果的总和。因此, 该方法能够比较全面地反映随机载荷全过程, 由载荷时间历程得到的应力-应变迟滞回线与造成的疲劳损伤是等效的。雨流统计法的原理图如图2所示。图中, τ_i 为循环次数。

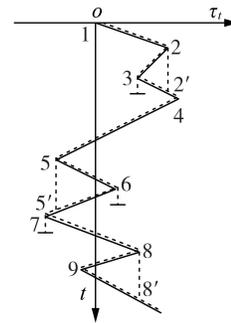


图2 雨流统计法原理图

Fig.2 Principle diagram of rainflow statistics method

雨流统计法的基本计数规则如下: ①雨流依次从载荷时间历程的峰值点 l 的内侧沿着斜坡向下流动, 即 $l=1, 2, 3, \dots$; ②雨流从某个峰值点开始流动, 当遇到比其起始峰值更大的峰值点时要停止流动; ③雨流遇到上面流下的雨流时, 必须停止流动; ④取出所有的全循环, 记下每个循环的幅度; ⑤将第一阶段计数后剩下的发散收敛载荷时间历程等效为一个收敛发散型的载荷时间历程, 进行第二阶段的雨流计数。计数循环的总数等于2个计数阶段的计数循环之和。

通过雨流统计法可以得到循环次数 τ_i , 而退化度的增量通过平均函数法得到。定义函数 $q(\xi_{t-\Delta t}, p^j) =$

$\eta \phi'_1(\xi_{t-\Delta t}) \sum_{j=1}^{\tau_i} \phi_2(p^j)$, 则平均函数为:

$$\bar{q} = \frac{1}{\tau_i} \sum_{j=1}^{\tau_i} q(\xi_{t-\Delta t}, p^j) = \frac{\phi'_1(\xi_{t-\Delta t})}{\tau_i} \sum_{j=1}^{\tau_i} \phi_2(p^j)$$

由 $\xi_t - \xi_{t-\Delta t} = \tau_i \bar{q}$ 可得最终退化度模型为:

$$\xi_t = \eta \phi'_1(\xi_{t-\Delta t}) \sum_{j=1}^{\tau_i} \phi_2(p^j) + \xi_{t-\Delta t} \quad (14)$$

3 剩余寿命计算

假设系统的未来影响因素将遵循某种分布规律和系统本身遵循模式变化的动力学,则剩余寿命取决于当前的退化状态以及系统的未来使用情况。设对系统进行 N 次蒙特卡罗模拟,则第 i 次蒙特卡罗运行下 $k\Delta t$ 时刻对应的退化度为:

$$\xi_{k\Delta t} = \psi_i(k\Delta t) \quad i=1, 2, \dots, N \quad (15)$$

其中, $\psi_i(k\Delta t)$ 为在第 i 次蒙特卡罗运行下 $k\Delta t$ 时刻与对应的退化度的函数关系。对式(15)取反函数,可得第 i 次蒙特卡罗运行下所对应的时刻为:

$$t_i(k\Delta t) = \psi_i^{-1}(\xi_i) \quad (16)$$

假定风电机组轴系从零时刻开始退化,退化度为1的时刻为 $t_i|_{\xi=1}$,则当进行第 i 次蒙特卡罗模拟时,第 $m(m=1, 2)$ 个转动轴 $k\Delta t$ 时刻下的剩余寿命为:

$$r_i^m(k\Delta t) = t_i^m|_{\xi=1} - t_i^m(k\Delta t) \quad (17)$$

则剩余寿命估计的期望及方差分别为:

$$E(r^m(k\Delta t)) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N r_i^m(k\Delta t) \quad (18)$$

$$p(r^m(k\Delta t)) = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (E(r^m(k\Delta t)) - r_i^m(k\Delta t)) \quad (19)$$

对于风电机组轴系系统而言,当前时刻系统的剩余寿命估计取决于2个转轴剩余寿命预估中的较小值,系统的方差为对应转动轴的方差。则系统的剩余寿命、方差分别为:

$$r(k\Delta t) = \min\{r^m(k\Delta t)\} \quad (20)$$

$$p(r^m(k\Delta t)) = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (E(r(k\Delta t)) - r_i(k\Delta t)) \quad (21)$$

风电机组轴系退化-扭振耦合模型的计算流程如图3所示。

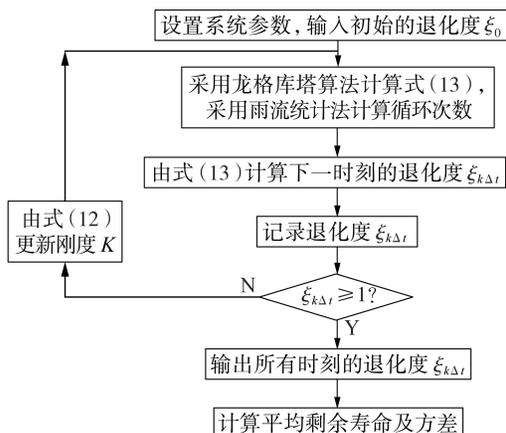


图3 风电机组轴系退化-扭振耦合模型计算流程图

Fig.3 Calculation flowchart of degradation-torsional vibration coupling model of wind turbine unit shafting

4 算例分析

为了验证剩余寿命预估算法,本节选取一台功率为2 MW的双馈风力发电机组作为仿真研究的对

象^[18]。根据上述分析,将风电机组等效为三质量块轴系模型,包括叶轮、齿轮箱、发电机转子质量块和质量块之间连接的高低速转动轴。其相关参数如附录B中表B1所示。其中,刚度是转轴未发生退化时的初始值,由式(13)可知,刚度系数值随转轴的退化而变化,因此可根据式(12)不断更新转轴的刚度值。

对于耦合退化模型中的退化过程,假设裂纹长度与外部负荷的方向是正交的,式(1)中的材料常数 $\gamma=2$ 。根据文献[20]中应力强度因子的工程算法,有限长有限宽的圆柱形杆在两端受力产生裂纹的情况下, $\phi_1(\delta)$ 可用式(22)表示,上述的风电机组轴系三质量块模型满足文献[20]中的应用条件。

$\phi_1(\delta) =$

$$[\pi\delta/(2r)] \{1.122 - 1.4\delta/(2r) + 7.33[\delta/(2r)]^2 - 13.08[\delta/(2r)]^3 + 14[\delta/(2r)]^4\}^2 \quad (22)$$

假定转轴的最大裂纹长度为 $\delta_m = r$,即此时的退化度为 $\xi=1$,在初始裂纹为0的情况下,退化度为 $\xi = \delta/\delta_m = \delta/r$,根据式(5)可以得到关于退化度的 $\phi_1'(\xi)$ 表达式,即:

$$\phi_1'(\xi) = (\pi\xi/2) [1.122 - 1.4\xi/2 + 7.33(\xi/2)^2 - 13.08(\xi/2)^3 + 14(\xi/2)^4]^2 \quad (23)$$

式(13)中的材料参数为 $\eta = 8 \times 10^{-6}$ 。理论上 $\xi_0 = 0$,但是根据式(13)可知,此时 $k\Delta t$ 时刻的 $\xi_{k\Delta t}$ 均为0,故将退化度初始值设为一个很小的值,即 $\xi_0 = 10^{-4}$ 。在仿真中,考虑到整个退化过程的时间跨度,时间间隔 Δt 取为10 min。

对风电机组轴系退化-扭振耦合模型进行100次蒙特卡罗模拟,得到的低速、高速转动轴的退化度(ξ_{12} 、 ξ_{23})曲线分别如附录B中图B1中蓝色、红色曲线所示。由曲线的变化趋势可知,2个转轴的退化速度均呈指数规律发展。在退化的初始阶段,退化的速度均较为缓慢,而高速转动轴的退化速度更慢。在退化的后期,退化的速度均较为迅速,而高速转动轴的退化速度更快。这是因为在退化的前期,形成的是微裂纹,经过一段时间当宏观裂纹产生后,退化速度增长得很快。

高速转动轴和低速转动轴退化的差异是由于其应力响应不同所引起的,而应力响应取决于相邻两质量块的扭转角差值。风轮机质量块的扭转角直接受到风速的影响,在退化初期,风轮机质量块的转速要远高于齿轮箱质量块的转速,由于惯性较大,齿轮箱质量块和发电机转子质量块转角差值要小于风轮机质量块和齿轮箱质量块的转角差值,从而使得这个时期低速转动轴的退化要比高速转动轴得快。随着风速的变化和风电机组的持续运行,风轮机质量块和齿轮箱质量块的扭转角差值减小,齿轮箱质量块和发电机转子质量块间的扭转角逐渐增大,使后期高速转动轴退化得更快。

将某风电场一年的风速数据作为样本^[19],采用

最大似然估计法求得威布尔分布的2个参数值分别 $a=3$ 和 $b=8.5$, 得到的风速概率分布如图4所示。图中, v 为风速。改变图4中风速概率分布曲线的参数 a 和 b 的值, 得到新的分布曲线, 并对转轴的退化度进行仿真, 如附录B中图B1所示。当风速概率分布参数 $a=4$ 和 $b=8.5$ 时, 低速、高速转动轴的退化度 (ξ'_{23} 、 ξ'_{12}) 曲线分别如图B1中绿色、黄色曲线所示; 当风速概率分布参数 $a=2$ 和 $b=7.5$ 时, 低速、高速转动轴的退化度 (ξ''_{12} 、 ξ''_{23}) 曲线分别如图B1中紫色、黑色曲线所示。对比原始的退化曲线可知, 当风速分布向更高的概率峰值附近集中时, 转轴的退化速度会加快, 曲线分布也更加集中; 当风速分布往较低的概率峰值附近分散时, 转轴的退化速度会减慢, 曲线分布也会更分散。

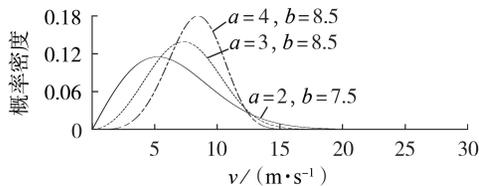


图4 风速概率分布

Fig.4 Probability distribution of wind speed

根据风电场的风速概率分布, 分别选取风速为 3、20 m/s 时这 2 种极端状况对本文提出的模型进行仿真, 风电机组轴系退化曲线如附录B中图B2的虚线所示。由图B2可知, 蒙特卡罗模拟的退化曲线均在风速为 3、20 m/s 下的退化曲线范围内, 说明通过蒙特卡罗法对本文建立的风电机组轴系模型进行仿真后, 所得退化过程具有较高的可靠性。风速为 3、20 m/s 下高速轴和低速轴的退化曲线对应于高速轴和低速轴退化的限值曲线。

低速、高速转动轴剩余寿命估计期望值曲线及其随风速概率分布参数改变而变化的曲线如图5所示。由图可知, 随着风电机组轴系的退化, 剩余寿命在退化初期减少的幅度较大, 到了后期减幅逐渐降低。与退化曲线相对应, 在相同的退化程度下前期退化所经历的时间段比后期长。当退化程度相同时, 高速转动轴的剩余寿命期望值较小, 故整个轴系

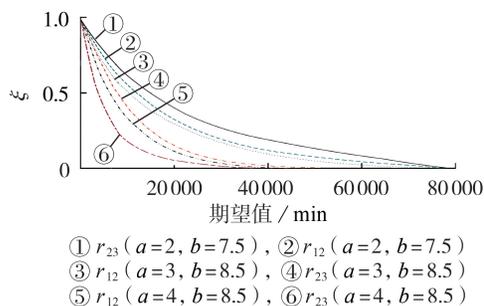


图5 风电机组轴系剩余寿命预估期望

Fig.5 Expected value of remaining lifetime estimation of wind turbine unit shafting

剩余寿命的估计曲线为高速转动轴的剩余寿命期望值曲线。当风速分布较大且较为集中时, 剩余寿命减少, 风速分布较小且较为分散时, 剩余寿命延长。

根据极端情况下的风速仿真所得风电机组轴系的退化限值曲线可以计算出相应的剩余寿命预估限值, 如图6所示。从图6中可以看出, 由蒙特卡罗模拟计算出的剩余寿命预估落在 2 条限值曲线中间, 证明了本文所建立的风电机组轴系剩余寿命预估模型的可靠性和准确性。

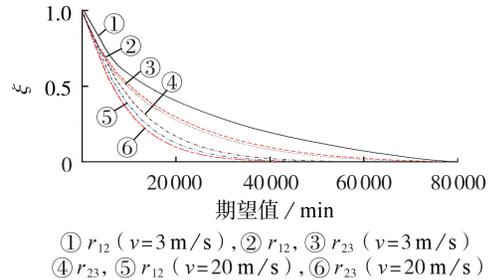


图6 风电机组轴系剩余寿命预估期望限值

Fig.6 Expected value limit of remaining lifetime estimation of wind turbine unit shafting

由图B1可知, 低速转动轴的剩余寿命预估方差总是高于高速转动轴。低速、高速转动轴剩余寿命预估方差及其随风速概率分布参数改变而变化的曲线如图7所示。由图7可知, 越靠近运行末期, 剩余寿命预估方差越小, 预测准确率越高。这是由于越靠近末期, 未来不确定因素对其影响越小。并且风速分布越集中, 剩余寿命预估方差越小。

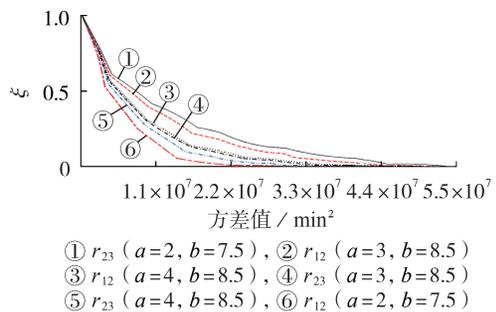


图7 风电机组轴系剩余寿命预估方差

Fig.7 Variance of remaining lifetime estimation of wind turbine unit shafting

5 结论

为考虑风速变化影响下风电机组轴系剩余预估寿命, 本文提出了一种风电机组轴系的退化-扭振耦合模型。该模型既考虑了风电机组轴系的旋转动态行为, 也引入了风速变化的影响, 更符合实际情况, 得出的退化过程和剩余寿命预估也更加准确。通过算例分析可知, 风电机组轴系的退化过程呈指数变化, 前期退化缓慢, 后期退化快速; 相较于高速转动轴, 低速转动轴退化受风速的影响更大, 剩余寿命预

测的方差较低,预测的准确度较低;剩余寿命预估的方差随着系统的退化逐渐减小,预估的准确度逐渐提高;风速的概率分布越向更高峰值附近集中,转轴的退化越快,轴系剩余寿命预估方差越小,反之,风速向更低的峰值分散,转轴退化越慢,剩余寿命估值方差越大。

风电机组轴系剩余寿命预估有利于运行状态的监控以及为维修计划的制定提供理论依据,从而降低风电机组的运行成本,提高经济效益。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 郭鹏,王兆光. 基于高斯过程回归和双滑动窗口残差处理的风电机组主轴状态监测[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(6): 34-40.
GUO Peng, WANG Zhaoguang. Wind turbine spindle state monitoring based on Gaussian process regression and double moving window residual processing[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(6): 34-40.
- [2] 黄新波,胡潇文,朱永灿,等. 基于卷积神经网络算法的高压断路器故障诊断[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(5): 136-140.
HUANG Xinbo, HU Xiaowen, ZHU Yongcan, et al. Fault diagnosis of high-voltage circuit breaker based on convolution neural network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(5): 136-140.
- [3] 杨洋. 基于遗传算法优化支持向量机的风电机组齿轮箱剩余寿命预测研究[D]. 长春:吉林大学, 2017.
YANG Yang. Research on remaining useful life prediction of gearbox of wind turbine based on genetic algorithm optimized support vector machine[D]. Changchun: Jilin University, 2017.
- [4] HU Yaogang, LI Hui, SHI Pingping, et al. A prediction method for the real-time remaining useful life of wind turbine bearings based on the Wiener process[J]. Renewable Energy, 2018, 127: 452-460.
- [5] 司敏劫,陈振斌,郑玉巧. 基于ANSYS兆瓦风力发电机叶片疲劳寿命分析[J]. 现代制造工程, 2016(10): 148-152.
SI Minjie, CHEN Zhenbin, ZHENG Yuqiao. Fatigue life analysis of megawatt wind turbine blade based on ANSYS[J]. Modern Manufacturing Engineering, 2016(10): 148-152.
- [6] 梁勇. 风电机组主轴轴承的疲劳寿命预测[D]. 兰州:兰州理工大学, 2013.
LIANG Yong. Fatigue life prediction for wind turbine main shaft bearings[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2013.
- [7] 毛俊超,郑甲红,马浩然. 2 MW 风力发电机低速轴承寿命分析[J]. 机械设计与制造, 2014(2): 206-208.
MAO Junchao, ZHENG Jiahong, MA Haoran. Low speed shaft bearing life analysis of the 2 MW wind turbine[J]. Machinery Design & Manufacture, 2014(2): 206-208.
- [8] 田宽引. 双馈风力发电机轴系扭转疲劳可靠性分析[D]. 太原:太原理工大学, 2016.
TIAN Kuanyin. Fatigue reliability analysis on shafts torsional vibration of doubly-fed wind generator[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2016.
- [9] 文薄程. 基于非线性接触分析的风电机组主轴结构分析技术研究[D]. 重庆:重庆大学, 2013.
WEN Bochong. Study on structure analysis technology for wind turbine main shaft based on nonlinear contact analysis[D]. Chongqing: Chongqing University, 2013.
- [10] SOBCZYK K, SPENCER B. Random fatigue: from data to theory[M]. San Diego, USA: Academic, 1993: 56-89.
- [11] 刘飞,解绍锋,侯东光,等. 基于器件结温的同相补偿变流器可靠性评估[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(1): 149-155.
LIU Fei, XIE Shaofeng, HOU Dongguang, et al. Reliability evaluation of co-phase compensation converter based on junction temperature of devices[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(1): 149-155.
- [12] 娄宇成,解大,冯俊淇,等. 基于三质量块模型的失速型风机小信号建模和模态分析[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(8): 124-130.
LOU Yucheng, XIE Da, FENG Junqi, et al. Small-signal modeling and modal analysis based on three-mass shaft model for stall wind turbine[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(8): 124-130.
- [13] 耿华,杨耕,周伟松. 考虑风机动态的最大风能捕获策略[J]. 电力自动化设备, 2009, 29(10): 107-111.
GENG Hua, YANG Geng, ZHOU Weisong. MPPT strategy considering wind turbine dynamics[J]. Electric Power Automation Equipment, 2009, 29(10): 107-111.
- [14] 马瑞,张强,吴瑕,等. 日风速随机模糊不确定模型[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(24): 6351-6358.
MA Rui, ZHANG Qiang, WU Xia, et al. Random fuzzy uncertain model for daily wind speed[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(24): 6351-6358.
- [15] 范钦珊,朱祖成. 材料力学手册[M]. 北京:中国建筑工业出版社, 1981: 51-71.
- [16] 王宗勇,林伟,闻邦椿. 开闭裂纹转轴刚度的解析研究[J]. 振动与冲击, 2010, 29(9): 69-72.
WANG Zongyong, LIN Wei, WEN Bangchun. Analytical study on the stiffness of open and closed crack shaft[J]. Journal of Vibration and Shock, 2010, 29(9): 69-72.
- [17] 赵洪山,林西阔,刘然,等. 考虑负荷快速频繁调节的汽轮-发电机轴系扭转寿命损耗分析[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(8): 143-149.
ZHAO Hongshan, LIN Youkuo, LIU Ran, et al. Torsional life loss assessment of turbine-generator shaft system with quick and frequent load regulation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(8): 143-149.
- [18] 赵祖熠,刘李勃,解大,等. 基于阻尼器的双馈风力发电系统扭转抑制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(3): 8-14.
ZHAO Zuyi, LIU Libo, XIE Da, et al. A novel torsional vibration damping method for a DFIG-based system[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(3): 8-14.
- [19] 马晓慧. 风速模型对风电机组功率曲线的影响研究[D]. 北京:华北电力大学, 2016.
MA Xiaohui. Research on wind speed model and its influence on power curve[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2016.
- [20] LEMAITRE J, CHABOCHE J. Mechanics of solid materials[M]. New York, USA: Cambridge Univ. Press, 1990: 253-256.

作者简介:



赵洪山

赵洪山(1965—),男,河北沧州人,教授,博士研究生导师,博士,主要研究方向为电力系统分析、运行和控制以及电力设备故障预测与优化检修(E-mail: zhaohshcn@126.com);

李自立(1993—),男,广西北海人,硕士研究生,主要研究方向为电力设备故障预测与优化检修(E-mail: 296814253@qq.com)。

(编辑 王欣竹)

(下转第99页 continued on page 99)

Review and prospect of cyber-physical development of power system under background of “Internet+” technology

WANG Dongfang¹, LIU Shuiyuan¹, ZHANG Yongjun², SONG Xudong³, LIN Xiaoming², CHEN Jiachao²

(1. Heyuan Power Supply Bureau of Guangdong Power Grid Co., Ltd., Heyuan 517000, China;

2. Research Center of Smart Energy Technology, School of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China;

3. Energy Technology Co., Ltd., Electric Power Research Institute of Guangdong Power Grid Co., Ltd., Guangzhou 510080, China)

Abstract: The transformation of energy technology promotes the development of power system technologies, and the innovative application of “Internet+” technology strengthens the connection between cyber system and physical system of electric power system. On the basis of comparing the informatization construction process of power system, the core characteristic of cyber-physical fusion is elaborated. Then, based on the research category of CPS (Cyber-Physical System), the research progress of cyber-physical power system in modeling analysis and interaction is summarized from two dimensions of numerical simulation and mechanism analysis, and the research challenges of related technologies are proposed for cyber-physical power system under the integration and innovation of “Internet+” technology. Finally, the development trend of key technologies of cyber-physical power system, such as primary-secondary integration, chip sensing, transparent network, blockchain, and so on, is prospected under the situation of “Internet+” technology.

Key words: “Internet+”; cyber-physical system; electric power systems; primary-secondary integration; transparent network

(上接第 75 页 continued from page 75)

Prognosis of remaining lifetime of wind turbine unit shafting

ZHAO Hongshan, LI Zili

(School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

Abstract: As a key component of the transmission system, the accurate prognosis of shafting remaining lifetime of the wind turbine unit is beneficial to the optimization of maintenance plan and the reduction of operating cost effectively. A degeneration-torsional vibration coupling model of wind turbine unit shafting is proposed, which combines the slow degradation process and rapid rotation behavior, and the influence of uncertain wind speed on unit shafting degradation is introduced. Using the fourth-order Runge-Kutta algorithm and rainflow statistics method, the degradation curve is obtained by multiple Monte Carlo simulations, and the expectation and variance of remaining lifetime are further obtained. The results show that the degradation of the wind turbine unit shafting is exponential, and the expectation and variance of the remaining lifetime are negatively exponential with the degradation.

Key words: wind turbines; unit shafting; degradation; remaining lifetime; Monte Carlo simulation; rainflow statistics method

附录 A

电磁转矩 T_e 和机械转矩 T_m 的公式推导如下。

电磁转矩 T_e 由风电机组电气部分的参量决定，即：

$$T_e = \frac{P_N}{2\pi f} p \quad (A1)$$

其中， P_N 为发电机的额定功率； f 为发电机输出的额定频率； p 为发电机的极对数。

由空气动力学模型可知^[13]，风力机的机械转矩可表示为：

$$T_m = \frac{0.5\rho\pi R^2 V^3 C_p}{\omega} \quad (A2)$$

其中， ρ 为空气密度； R 为叶片的半径； V 为风速； ω 为风力机转子角速度； C_p 为风能捕获系数，其与桨距角 β 和叶尖速比 λ 有关。尖速比 λ 和风能捕获系数 C_p 的一般计算式为：

$$\lambda = \frac{\omega R}{V} \quad (A3)$$

$$C_p = (0.44 - 0.0167\beta) \sin \frac{\pi(\lambda - 2)}{13 - 0.3\beta} - 0.00184(\lambda - 2)\beta \quad (A4)$$

威布尔分布是目前被认为是描述风速分布比较理想的模型^[14]，两参数的威布尔分布的概率密度函数为：

$$f(V) = \frac{a}{b} \left(\frac{V}{b}\right)^{a-1} \exp\left(-\left(\frac{V}{b}\right)^a\right) \quad (A5)$$

其中，参数 a 称为威布尔分布的形状参数， b 称为威布尔分布的比例参数。通过最大似然估计可求得 a 和 b 的值。

附录 B

表 B1 风电机组轴系参数
Table B1 Parameters of wind turbine unit shafting

参数	参数值	参数	参数值
转动惯量 J_1 / ($\text{kg} \cdot \text{m}^2$)	6.41×10^6	转动惯量 J_2 / ($\text{kg} \cdot \text{m}^2$)	2.673×10^5
转动惯量 J_3 / ($\text{kg} \cdot \text{m}^2$)	4.418×10^4	自阻尼 D_1 、 D_2 、 D_3	0.2、0.2、0.2
互阻尼 D_{12} 、 D_{23}	0、0	低速轴刚度 K_{12} / ($\text{N} \cdot \text{m}$)	9.22×10^4
高速轴刚度 K_{23} / ($\text{N} \cdot \text{m}$)	6.59×10^4	空气密度 ρ / ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	1.25
叶片半径 R /m	40	桨距角 β / ($^\circ$)	0
低速轴、高速轴半径 r /m	0.5	弹性模量/MPa	2.06×10^5
发电机极对数 p	4	发电机输出额定频率 f /Hz	50
齿轮箱传动比 n	47		

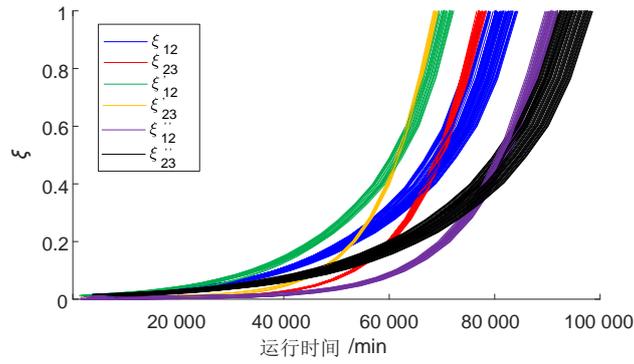


图 B1 风电机组轴系退化曲线

Fig.B1 Wind turbine unit shafting degradation curve

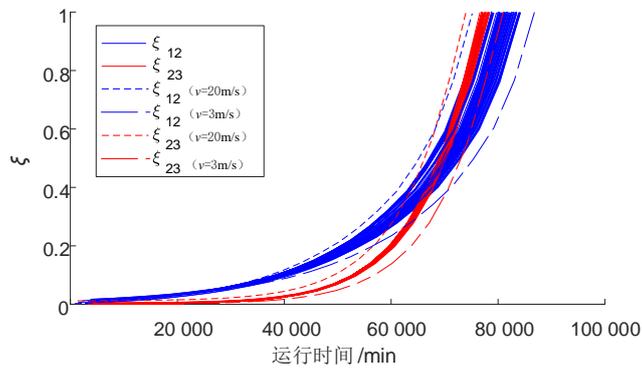


图 B2 风电机组轴系退化限值曲线

Fig.B2 Wind turbine unit shafting degradation limit curve