

DOI: 10.19666/j.rlfed.202308138

双馈型风电机组传动链降载控制技术 研究与仿真

刘河生, 雷航, 张瑞刚
(西安热工研究院有限公司, 陕西 西安 710054)

[摘要] 为定量研究双馈型风力发电机组传动链的扭振控制, 提出了一种基于卡尔曼滤波的反馈控制策略, 并通过仿真计算的方式对比了传动链扭振的控制效果。以 7.0 MW 双馈型风力发电机组传动链为研究对象, 采用卡尔曼滤波估计传动链扭振角度, 并以低速轴扭振速度估计值为参考设计了发电机附加电磁转矩作用于风电机组转矩控制, 与虚拟阻尼控制、无阻尼控制进行了 20 年全生命周期内的载荷与发电量计算对比。结果表明: 经过卡尔曼滤波估计的低速轴扭角与实际值的相关性可以达到 0.99; 基于卡尔曼滤波的反馈控制分别与虚拟阻尼控制、无阻尼控制的关键差异为, 传动链低速轴等效疲劳载荷分别降低 2.11%、4.89%, 传动链高速轴等效疲劳载荷分别降低 1.99%、4.78%, 发电量分别降低 200、700 kW·h。卡尔曼滤波对传动链扭角估计较准确, 且以卡尔曼滤波估计得到的低速轴扭振速度设计的附加电磁转矩对传动链扭振具有非常好的抑制效果。

[关键词] 双馈型风电机组; 传动链扭振; 卡尔曼滤波; 等效疲劳载荷; 年发电量

[引用本文格式] 刘河生, 雷航, 张瑞刚. 双馈型风电机组传动链降载控制技术研究仿真[J]. 热力发电, 2024, 53(3): 34-41.
LIU Hesheng, LEI HANG, ZHANG Ruigang. Research and simulation of load reduction control technology for the drive train of doubly-fed wind turbine[J]. Thermal Power Generation, 2024, 53(3): 34-41.

Research and simulation of load reduction control technology for the drive train of doubly-fed wind turbine

LIU Hesheng, LEI Hang, ZHANG Ruigang
(Xi'an Thermal Power Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710054, China)

Abstract: A feedback control strategy based on Kalman filter was proposed to quantitatively study the drive train torsional vibration mitigation of doubly-fed wind turbine, and the control effect of drive train torsional vibration was compared through simulation calculation. Taking the drive train of 7.0 MW doubly-fed wind turbine as the research object, the Kalman filter was used to estimate the twist angle of the drive train, and an additional electromagnetic torque of the generator was designed for torque control based on the estimated torsional speed of low-speed shaft. The load and power generation calculations were compared with virtual damping control and no-damping control over 20 years full life cycle. The results show that, the correlation between the twist angle of the low-speed shaft estimated by the Kalman filter and the actual value can reach 0.99. The key differences between the feedback control based on the Kalman filter, the virtual damping control and the non-damping control are as follows. The equivalent fatigue load of the low-speed shaft of the drive train reduces by 2.11% and 4.89%, respectively. The equivalent fatigue load of the high-speed shaft of the drive train reduces by 1.99% and 4.78%, respectively. The power generation reduces by 200 kW·h and 700 kW·h, respectively. It can be concluded that the Kalman filter has a good estimating effect on the twist angle of drive train, and the designed additional

收稿日期: 2023-08-10

基金项目: 西安热工研究院有限公司科技项目 (TQ-22-TYK27)

Supported by: Science and Technology Project of Xi'an Thermal Power Research Institute Co., Ltd. (TQ-22-TYK27)

第一作者简介: 刘河生 (1995), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为大容量风电机组先进降载控制技术, liuhesheng@tpri.com.cn.

通信作者简介: 张瑞刚 (1982), 男, 硕士, 正高级工程师, 主要研究方向为风电机组功率与载荷协同控制技术, zhangruigang@tpri.com.cn.

electromagnetic torque based on the estimated torsional speed of low-speed shaft obtained by Kalman filtering has a very good suppression effect on the torsional vibration of the drive train.

Key words: doubly fed wind turbine; drive train torsional vibration; Kalman filter; equivalent fatigue load; annual energy output

风电机组传动链一方面将风轮吸收的气动转矩转化为机械转矩传递给发电机,另一方面将数百吨的风轮支撑在高空,是整个风电机组能量传递的关键节点。相关文献表明,传动链故障在机组所有故障类型中占比并不高,但引起的停机时间却最长^[1]。2020年以来,风电机组传动链故障引发的恶性事故频繁发生,且随着单机容量的不断增大及海上风电机组运维和施工成本的普遍提高,传动链系统稳定性、可靠性是制约风电场盈利水平的关键因素。

风电机组风轮拥有巨大的转动惯量,由于风轮所受气动转矩和发电机电磁转矩(折合到低速轴侧)存在偏差,风轮会出现加速和减速现象,这种加速和减速现象是造成传动链扭转振动的主要原因。为了解决风电机组传动链的共振问题,一方面从机组设计角度,需要尽量使传动链的固有频率避开其他系统的激励频率;另一方面,从控制角度,在测量的发电机转速信号中对风轮转频进行陷波滤波,避免风轮转频的倍数频接近传动链的固有频率,同时,通过附加转矩或者附加桨距角来调节电磁转矩或者气动转矩也可以减缓传动链的扭转振动。

文献[2]通过对传动链扭转振动特性进行分析,建立了转轴、行星齿轮系统和平行齿轮副的扭转振动模型和运动微分方程,推导风机传动系统各质量单元间状态量的传递关系,采用黎卡提传递矩阵法计算了轴系的扭振固有特性;文献[3]以兆瓦级风电机组为研究对象,建立传动链刚柔耦合的多体动力学仿真模型;文献[4]提出了基于二自由度PID的独立变桨距控制策略,优化了传动链载荷,同时机组发电功率基本不受影响;文献[5]设计了基于卡尔曼滤波器的传动链扭角估计方法,数值仿真结果表明,相较于传统带通滤波器控制效果,卡尔曼滤波器应用于风电机组传动链扭振控制具有较好的控制效果;文献[6]提出了考虑传动链疲劳载荷的惯量控制方法,通过疲劳载荷最小化和惯量响应出力范围约束实时求解风电机组功率参考值,通过每个积分步长上的功率调节,同时实现疲劳载荷最小化和惯量响应能力最大化;文献[7]针对6.2 MW浮式风电机组传动链的扭振抑制问题,建立了基于自抗扰控制算法的传动链扭振抑制策略,并通过仿真平台

验证了控制策略的有效性;文献[8]对自抗扰控制策略做了改进,补偿了传动链的未知扰动,在对传动链模型进行线性化处理,将非线性状态误差反馈转矩设定值转化为功率设定值,进而抑制系统扭振,使得对扰动补偿更精确,提高了控制器的性能,该策略在阶跃风况和湍流风况下的扭振抑制效果相对更好;文献[9]总结出针对风电机组轴系的扭振控制技术,机械侧可以通过调整叶片桨距角和改善风电机组轴系的参数来增大结构阻尼或者改善固有频率,避免风电机组的轴系扭振,电气侧通过控制电磁转矩、转子电流和有功、无功功率来抑制轴系扭振。

1 传动链载荷特性分析

传动链的载荷特性和风轮所受的气动载荷特性密不可分。以7.0 MW双馈型风力发电机组模型为例,以18 m/s的恒定风作为输入,对不同风切变指数下传动链低速轴转矩、传动链扭角的波动特性进行仿真。根据文献[10]的描述,塔影效应对风载荷影响与风切变相似,故此次不再研究塔影效应对传动链载荷的影响。

风切变对低速轴扭角和扭矩的影响如图1所示。从图1可以看出,低速轴转矩、扭角随着风切变呈现周期性波动,且随着风切变指数的变大而增强。

风切变下低速轴扭角和扭矩谱密度分析如图2所示。从图2可以看出,低速轴转矩和扭角均在风轮转频(0.2 Hz)的3P、6P、9P处出现周期性分量,且集中在3P频率处。同时,传动链固有频率与风轮转频的6P非常接近,在传动链系统欠阻尼与陷波滤波处理不好的情况下很容易发生传动链系统的共振,造成齿轮箱损坏。

2 传动链建模

双馈型风力发电机组传动链系统包含主轴、主轴承、齿轮箱、联轴器、发电机。通常情况下,风轮与主轴、发电机转子与齿轮箱高速轴均为刚性连接^[11-13],而风轮与齿轮箱的连接,则可认为是柔性连接。本文采用两质量块模型(图3)对双馈型风力发电机组传动链进行数学建模,该模型允许低速侧主轴与发电机转子之间有一定的扭转运动^[14]。

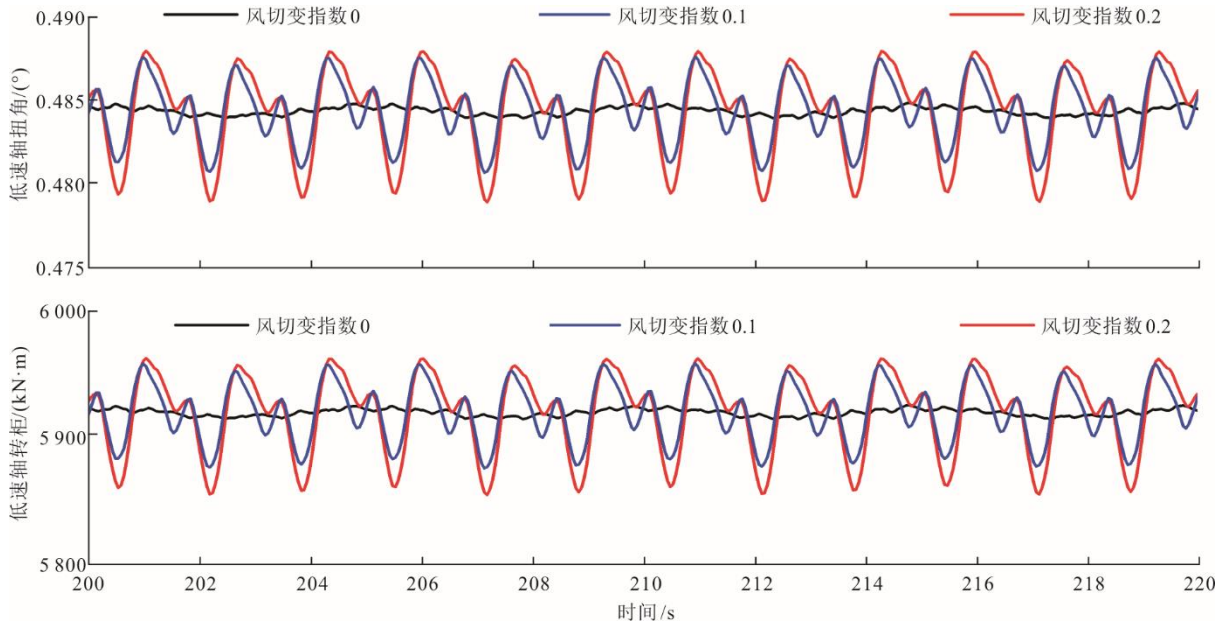


图 1 风切变对低速轴扭角和扭矩的影响
Fig.1 The effect of wind shear on low-speed shaft twist angle and torque

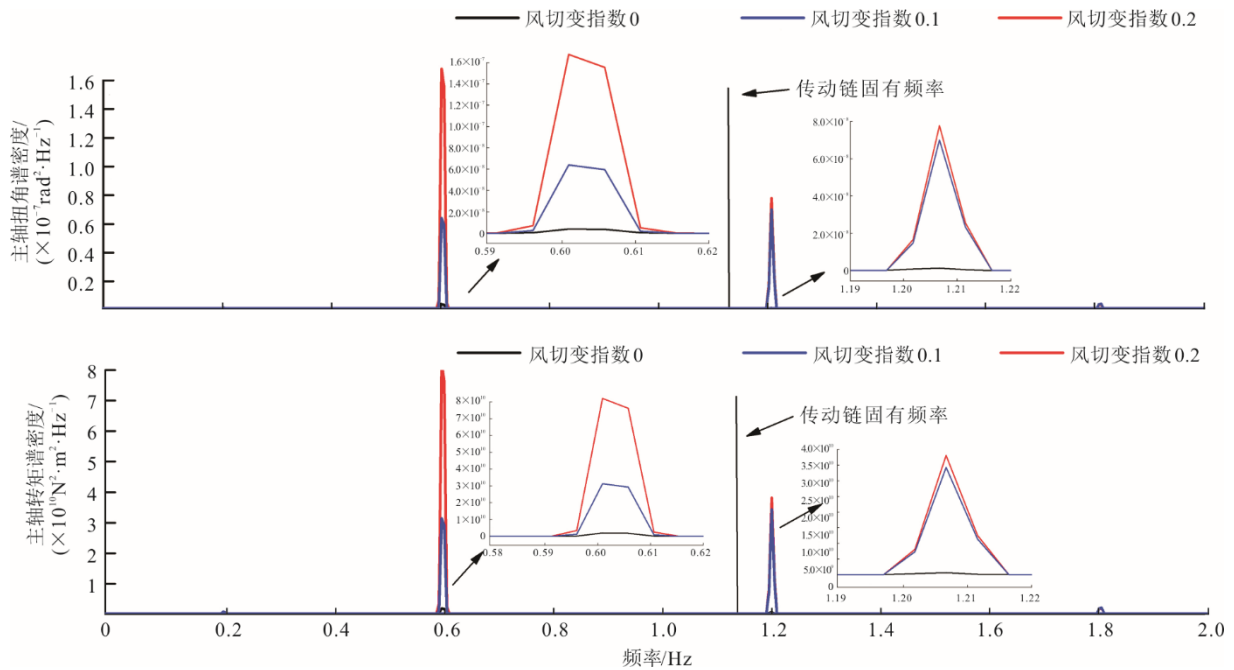


图 2 风切变下低速轴扭角和扭矩谱密度分析
Fig.2 Analysis of low-speed shaft twist angle and torque spectral density under wind shear

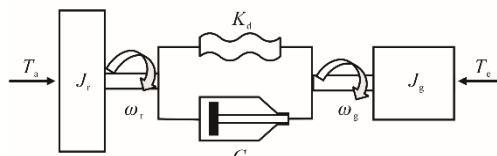


图 3 两质量块传动链模型
Fig.3 The two-mass-block drive chain model

在忽略机械损失的情况下，传动链两质量块模

型运动方程为^[12-13]：

$$J_r \frac{d\omega_r}{dt} = T_a - C_d(\omega_r - \omega_g) - K_d(\theta_r - \theta_g) - T_l \quad (1)$$

$$J_g \frac{d\omega_g}{dt} = C_d(\omega_r - \omega_g) + K_d(\theta_r - \theta_g) - T_c \quad (2)$$

$$\frac{d\theta_r}{dt} = \omega_r \quad (3)$$

$$\frac{d\theta_g}{dt} = \omega_g \quad (4)$$

$$T_l = C_c + C_r \omega_r \quad (5)$$

式中： J_r 、 J_g 分别为风轮、发电机转动惯量（折合到低速轴侧）； ω_r 、 ω_g 分别为风轮、折合到低速侧的发电机转速； T_a 、 T_c 分别为风轮气动转矩、折算到低速轴的发电机电磁转矩； C_d 、 K_d 分别为传动链等效阻尼、等效刚度； θ_r 、 θ_g 分别为低速轴、发电机折算到低速轴扭角； T_l 为损失的气动转矩； C_c 为风轮气动转矩损失常量； C_r 为气动转矩损失系数。

本文 7.0 MW 双馈型风电机组模型传动链的主要参数见表 1。

表 1 传动链参数
Tab.1 The drive train parameters

传动链参数	数值
$J_r/(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$	91 588 300
$J_g/(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$	9 853 540
$C_d/(\text{N}\cdot\text{m}\cdot\text{s}\cdot\text{rad}^{-1})$	188 897
$K_d/(\text{N}\cdot\text{m}\cdot\text{rad}^{-1})$	7.0×10^8
i_{gb}	97.16

3 传动链扭振控制

根据传动链运动方程，传动链低速轴侧的扭角可以表示为 $\gamma_{sh} = \theta_r - \theta_g$ ，低速轴侧扭角的运动方程为：

$$\frac{J_r J_g}{J_r + J_g} \ddot{\gamma}_{sh} + K_d \dot{\gamma}_{sh} + C_d \dot{\gamma}_{sh} = \frac{J_g (T_a - T_l) + J_r T_c}{J_r + J_g} \quad (6)$$

$$\omega_d = \sqrt{\frac{K_d}{J_r J_g / (J_r + J_g)}} \quad (7)$$

$$\xi_d = \frac{C_d}{2\sqrt{k_d J_r J_g / (J_r + J_g)}} \quad (8)$$

式中： γ_{sh} 、 $\dot{\gamma}_{sh}$ 、 $\ddot{\gamma}_{sh}$ 分别为低速轴侧的扭角、扭转速度、扭转加速度； ω_d 为传动链的自然振荡频率； ξ_d 为阻尼率。

传动链的自然振荡频率与阻尼系数和刚度系统有关，在考虑阻尼后系统真实的振荡频率可以表示为 $\omega_c = \omega_d \sqrt{1 - \xi_d^2}$ 。从式(8)可以看出风电机组传动链自身阻尼非常低，是一个欠阻尼系统，约为 1%~1% 级别，极低的阻尼率导致系统在外界激励下很容易发生共振，消耗传动链机械部件疲劳寿命。

根据式(6)，分别以上述电磁转矩 T_c 和气动转矩 T_a 作为输入变量，低速轴扭角作为输出变量的传递函数：

$$\frac{\gamma_{sh}(s)}{T_c(s)} = \frac{1}{J_g (s^2 + 2\xi\omega_d s + \omega_d^2)} \quad (9)$$

$$\frac{\gamma_{sh}(s)}{T_a(s)} = \frac{1}{J_r (s^2 + 2\xi\omega_d s + \omega_d^2)} \quad (10)$$

分别求得不同传递函数下幅相频域曲线如图 4 所示。由图 4 可以看出，不同输入下，传动链固有频率下主轴扭振幅值增益均较大，且电磁转矩较气动转矩对低速轴扭振幅值增益的影响更大。

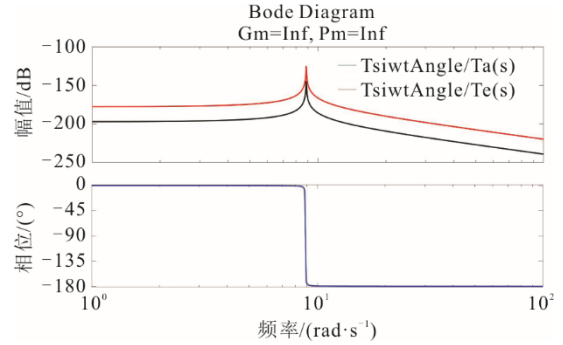


图 4 传递函数频域特性

Fig.4 Frequency domain characteristics of transfer function

3.1 卡尔曼滤波

卡尔曼滤波是一种利用线性系统状态方程，通过系统输入输出观测数据，对系统状态进行最优估计的算法^[15-16]。

连续系统的状态空间方程可以表示为：

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu + Gw \\ y &= Cx + Du + v \end{aligned} \quad (11)$$

式中： A 、 B 、 C 、 D 、 G 分别为系数矩阵； w 为过程白噪声； v 为信号测量噪声。

过程白噪声和测量噪声的统计特性可以描述为：

$$\begin{cases} E(w) = 0 \\ E(ww^T) = Q \\ E(v) = 0 \\ E(vv^T) = R \\ E(xw^T) = 0 \\ E(xv^T) = 0 \end{cases} \quad (12)$$

对于某一状态 x 的最小方差估计值记为 \hat{x} ，其极小化性能指标为：

$$J = E[(x - \hat{x})^T (x - \hat{x})] \quad (13)$$

可以利用卡尔曼滤波来求 J 的最小值：

$$\dot{\hat{x}} = A\hat{x} + K[y - C\hat{x} - Du] \quad (14)$$

式中： K 为卡尔曼滤波增益。滤波方程(14)可以视为一个在 $K[y - C\hat{x} - Du]$ 作用下的线性系统，其结构如图 5 所示。

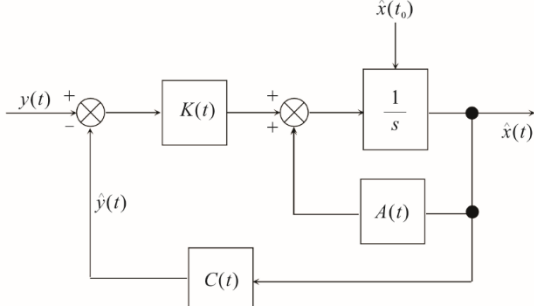


图 5 滤波方程结构

Fig.5 Structural diagram of the Filter equation

$$\mathbf{K} = \mathbf{P}\mathbf{C}^T\mathbf{R}^{-1} \quad (15)$$

可以通过 Riccati 方程求解 \mathbf{K} :

$$\dot{\mathbf{P}} = \mathbf{A}\mathbf{P} + \mathbf{P}\mathbf{A}^T + \mathbf{B}\mathbf{Q}\mathbf{B}^T - \mathbf{P}\mathbf{C}^T\mathbf{R}^{-1}\mathbf{C}\mathbf{P} \quad (16)$$

离散系统的状态空间方程为:

$$\begin{aligned} \mathbf{x}_k &= \mathbf{A}\mathbf{x}_{k-1} + \mathbf{B}\mathbf{u}_k + \mathbf{G}\mathbf{w}_k \\ \mathbf{y}_k &= \mathbf{C}\mathbf{x}_k + \mathbf{D}\mathbf{u}_k + \mathbf{v}_k \end{aligned} \quad (17)$$

卡尔曼滤波的离散过程可以表示为:

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{x}}_{k|k-1} &= \mathbf{A}\hat{\mathbf{x}}_{k-1} + \mathbf{B}\mathbf{u}_k \\ \mathbf{P}_{k|k-1} &= \mathbf{A}\mathbf{P}_{k-1}\mathbf{A}^T + \mathbf{Q} \\ \mathbf{Q} &= \mathbf{G}\mathbf{G}^T\sigma_w^2 \\ \mathbf{K}_k &= \mathbf{P}_{k|k-1}\mathbf{A}^T(\mathbf{R} + \mathbf{A}\mathbf{P}_{k|k-1}\mathbf{A}^T)^{-1} \\ \hat{\mathbf{x}}_k &= \hat{\mathbf{x}}_{k|k-1} + \mathbf{K}_k(\mathbf{y}_k - \mathbf{C}\hat{\mathbf{x}}_{k|k-1} - \mathbf{D}\mathbf{u}_k) \\ \mathbf{P}_k &= (\mathbf{I} - \mathbf{K}_k\mathbf{A})\mathbf{P}_{k|k-1} \end{aligned} \quad (18)$$

将传动链模型表示为状态空间方程形式:

$$\begin{bmatrix} \dot{\gamma} \\ \dot{\gamma} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -(J_r + J_g)c_d & (J_r + J_g)k_d \\ J_r J_g & J_r J_g \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\gamma} \\ \gamma \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 \\ J_g \\ 0 \end{bmatrix} T_c + \begin{bmatrix} 1 \\ J_r \\ 0 \end{bmatrix} T_a \quad (19)$$

$$\dot{\omega}_g = \begin{bmatrix} c_d & k_d \\ J_g & J_g \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\gamma} \\ \gamma \end{bmatrix} + \frac{-1}{J_g} T_g \quad (20)$$

式中: 电磁转矩 T_e 和气动转矩 T_a 为 2 个输入变量。

以 7.0 MW 双馈型风电机组模型为例, 在平均风速 12 m/s 的湍流风况下, 对卡尔曼滤波估计的传动链低速轴扭角和实际扭角进行仿真对比。图 6 为主轴扭角对比。从图 6 可以看出, 经过卡尔曼滤波估计的低速轴扭角与实际值跟踪情况非常好, 经过数值拟合, 相关性可以达到 0.99。

3.2 等效虚拟阻尼

式(6)传动链主轴扭角的运动方程可以改写为:

$$\begin{aligned} \frac{J_r J_g}{J_r + J_g} \ddot{\gamma}_{sh} + k_d \dot{\gamma}_{sh} + C_d \dot{\gamma}_{sh} &= \frac{J_g(T_a - T_1) + J_r T_e}{J_r + J_g} + \Delta T \\ \frac{J_r J_g}{J_r + J_g} \ddot{\gamma}_{sh} + k_d \dot{\gamma}_{sh} + (C_d + C_v) \dot{\gamma}_{sh} &= \frac{J_g(T_a - T_1) + J_r T_e}{J_r + J_g} \end{aligned} \quad (21)$$

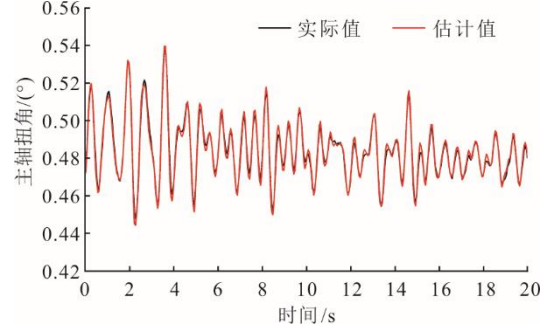


图 6 主轴扭角对比

Fig.6 Comparison of main shaft twist angle

式中: ΔT 为附加转矩纹波; C_v 为由附加转矩纹波等效转化的虚拟阻尼。

由于电磁转矩具有极高的带宽, 因此可以快速效应附加转矩纹波的控制需求, 选择发电机转速近似代替主轴的扭振速度, 再针对发电机转速乘以反馈增益即可实现传动链的虚拟阻尼控制。为了更好地实现这种虚拟阻尼控制效果, 可以对输入的发电机转速信号进行带通滤波处理。滤波器的中心频率可以选择传动链固有频率, 同时为了避免较大的功率波动, 需要将转矩纹波的绝对值限制在发电机额定转矩的 3% 以内。

带通滤波器的传递函数可以表示为:

$$H_{\text{band}}(s) = K \frac{\xi \omega s}{s^2 + 2\xi \omega s + \omega^2} \quad (22)$$

考虑到实际风电机组执行控制指令时会有一定时间的滞后, 因此在带通滤波器前端可以串联相位补偿器来抵消执行机构的滞后, 达到预期控制效果。相位补偿器的传递函数为:

$$G(s) = \frac{\omega \sqrt{\frac{1 + \sin \theta}{1 - \sin \theta}} + \frac{1 + \sin \theta}{1 - \sin \theta} s}{\omega \sqrt{\frac{1 + \sin \theta}{1 - \sin \theta}} + s} \quad (23)$$

式中: w 为被补偿信号频率; θ 为需超前的相位角。

3.3 基于卡尔曼滤波的反馈控制

实际运行的风电机组无法对传动链低速轴的扭振速度进行测量。本文针对低速轴的扭振特性设计了转矩纹波反馈控制回路, 以卡尔曼滤波器估计所得传动链低速轴扭振速度为输入信号, 利用 PID 控制器设计的转矩纹波为输出信号, 控制框图如图 7 所示。

4 仿真分析

依据 *Wind energy generation systems-Part 1: Design requirements* (IEC 61400-1—2016), 利用 DNV GL Bladed 软件对 7.0 MW 双馈型风电机组模

型进行载荷和发电量仿真计算, 仿真变桨 PI 控制参数见表 2。湍流风采用 Kaimal 模型, 轮毂高度处年平均风速为 8.5 m/s, 空气密度为 1.225 kg/m³。

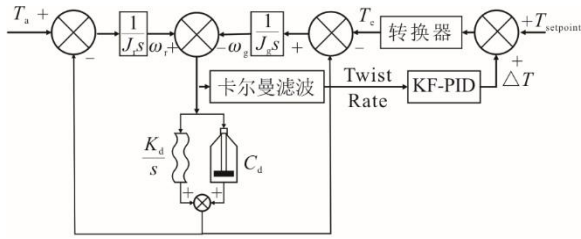


图 7 传动链扭振抑制控制
Fig.7 Block diagram of drive train torsional vibration suppression control

表 2 变桨控制参数
Tab.2 Pitch control parameters

桨距角/rad	比例增益	积分增益
0.079 0	0.003 0	0.000 2
0.117 9	0.003 1	0.000 3
0.148 8	0.003 9	0.000 5
0.175 8	0.004 5	0.000 7
0.200 2	0.005 2	0.000 9
0.222 9	0.005 9	0.001 0
0.244 2	0.005 1	0.001 1
0.264 6	0.005 4	0.001 2
0.284 0	0.005 5	0.001 3
0.302 8	0.004 8	0.001 3
0.320 9	0.005 3	0.001 5
0.338 5	0.005 9	0.001 5
0.355 6	0.004 1	0.001 5
0.372 3	0.006 9	0.001 1

4.1 湍流风况下控制分析

在平均风速为 18 m/s, 横向、纵向、垂直方向的湍流强度分别为 16.98%、13.58%、8.49%的湍流风况下, 分别对不同控制策略作用下传动链固有频率下低速轴扭角谱密度、机组输出功率、低速轴扭角波动情况进行对比分析。图 8 为不同控制策略下低速轴扭角谱密度对比。

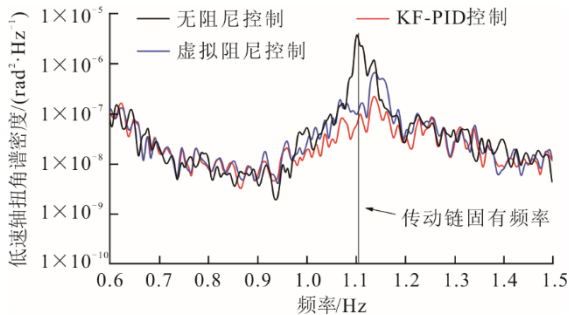


图 8 不同控制策略下低速轴扭角谱密度对比
Fig.8 Comparison of low-speed shaft twist angle spectral density under different control strategies

由图 8 可以看出, 基于 KF-PID 的控制策略下, 低速轴扭角谱密度在传动链故障频率处分别是无阻尼控制和虚拟阻尼控制的 26.95%、60.88%。图 9、图 10 为不同控制策略下输出功率、传动链扭角对比。

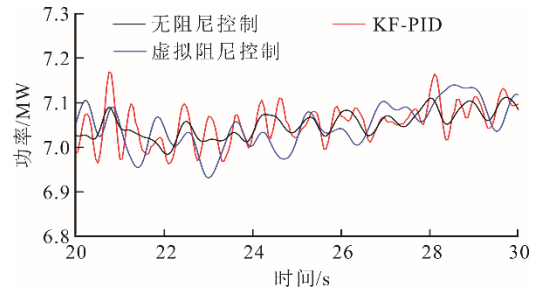


图 9 不同控制策略下输出功率对比
Fig.9 Comparison of output power under different control strategies

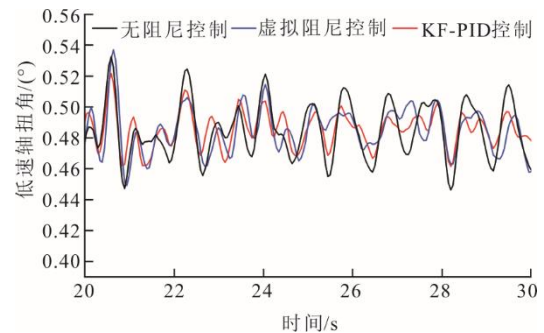


图 10 不同控制策略下传动链扭角对比
Fig.10 Comparison of drive train twist angle under different control strategies

表 3 为功率和扭角数值仿真的统计结果。KF-PID 控制相较于无阻尼控制、虚拟阻尼控制, 机组输出功率与低速轴扭角平均值保持一致, 功率标准差分别增加 17.6%、33.3%, 低速轴扭角标准差分别降低 26.7%、38.9%, 即 KF-PID 在减缓低速轴扭振的同时会增加机组输出功率波动。为了更完整体现控制策略的优劣性, 有必要对机组 20 年生命周期内的功率与载荷进行对比分析。

表 3 功率和扭角数值仿真工况参数
Tab.3 Operating condition parameters for power and twist angle numerical simulation

控制策略	功率/kW		低速轴扭角/(°)	
	平均值	标准差	平均值	标准差
无阻尼	7.051	0.030	0.485	0.018
虚拟阻尼	7.051	0.044	0.485	0.015
KF-PID	7.051	0.050	0.485	0.011

4.2 疲劳载荷分析

机组的等效疲劳载荷计算通过雨流计数法来

统计,其中应力与循环次数曲线(S-N曲线)会涉及到材料的反斜率值,传动链部件的反斜率值取为4。机组20年生命周期内仿真工况参数见表4。20年寿命期内 1×10^7 次循环下传动链低速轴、高速轴处的等效疲劳载荷如图11—图14及表5所示。

表4 机组20年生命周期内仿真工况参数

Tab.4 Simulated operating conditions parameters within the 20-year life cycle of the unit

疲劳工况	风况	描述
DLC1.2	$V_{in} < V_{hub} < V_{out}$	正常发电
DLC2.4	$V_{in} < V_{hub} < V_{out}$	发电兼故障
DLC4.1	$V_{in} < V_{hub} < V_{out}$	正常停机
DLC6.4	$V_{hub} < 0.7V_{ref}$	空转

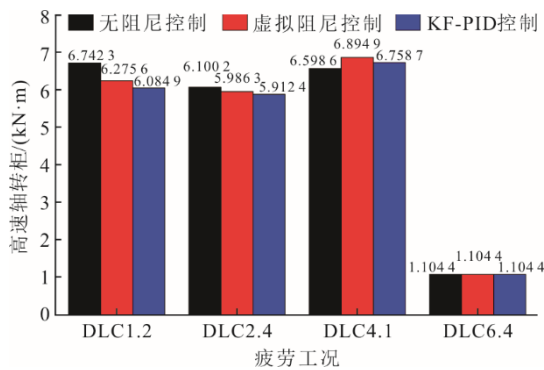


图11 不同工况下高速轴20年等效疲劳载荷对比

Fig.11 Comparison of 20-year equivalent fatigue loads of high-speed shaft under different operating conditions

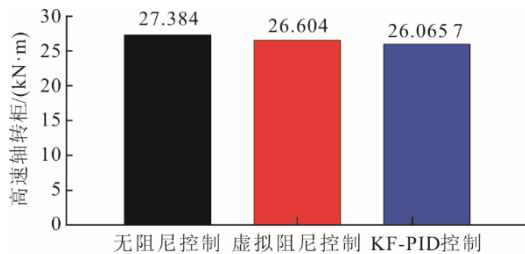


图12 高速轴20年等效疲劳载荷对比

Fig.12 Comparison of 20-year equivalent fatigue loads for high-speed shaft

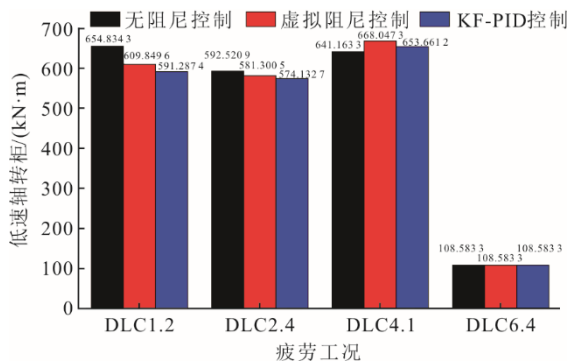


图13 不同工况下低速轴20年等效疲劳载荷对比

Fig.13 Comparison of 20-year equivalent fatigue loads of low-speed shaft under different operating conditions

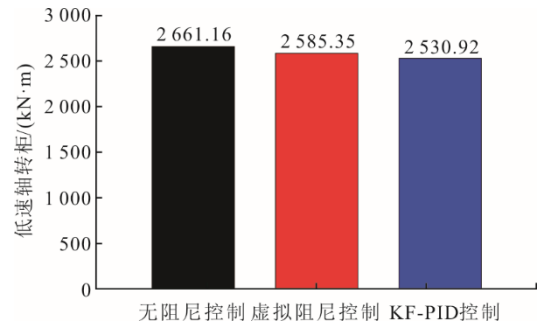


图14 低速轴20年等效疲劳载荷

Fig.14 Comparison of 20-year equivalent fatigue loads for low-speed shaft

表5 20年等效疲劳载荷

Tab.5 The 20-year equivalent fatigue loads

策略	低速轴转矩/(kN·m)	降幅/%	高速轴转矩/(kN·m)	降幅/%
无阻尼	2661.16	4.89	27.38	4.78
虚拟阻尼	2585.35	2.11	26.60	1.99
KF-PID	2530.92		26.07	

从图11—图14、表5可以看出:在风电机组20年生命周期内,KF-PID控制相较于无阻尼控制、虚拟阻尼控制,低速轴转矩等效疲劳载荷分别降低4.89%、2.11%;高速轴转矩等效疲劳载荷分别降低4.78%、1.99%。

4.3 发电性能分析

对不同控制策略下模型机组20年生命周期内发电量进行评估,结果如图15所示。由图15可以得出,KF-PID控制相较于虚拟阻尼控制、无阻尼控制机组总体发电量分别降低200、700 kW·h,这部分发电量损失在机组20年的生命周期内基本可以忽略不计。

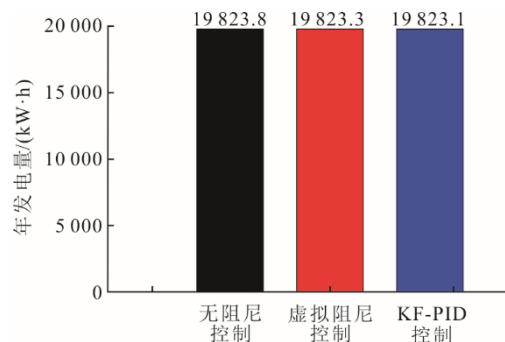


图15 20年发电量对比

Fig.15 Comparison of power generation in 20 years

5 结论

本文在7.0 MW双馈型风电机组模型基础上,提供了适用于变桨控制的PI控制参数,并针对低速

轴扭转速度无法测量的问题,利用卡尔曼滤波进行了估计,基于卡尔曼滤波估计得到的低速轴扭振速度设计了反馈控制转矩纹波以减缓传动链的扭转振动。

1) 卡尔曼滤波估计的传动链扭振速度与传动链实际扭振速度高度贴合,相关性 R^2 可达 0.99。

2) 根据传动链动力学方程分析了不同输入下低速轴扭角的幅相特性,发现电磁转矩相较于气动转矩,更容易激发传动链扭振。

3) 在 20 年生命周期内,基于卡尔曼滤波的传动链扭振反馈控制器的作用下,低速轴扭矩等效疲劳载荷比虚拟阻尼控制低 2.11%,比无阻尼控制低 4.89%;高速轴扭矩等效疲劳载荷比虚拟阻尼控制低 1.99%,比无阻尼控制低 4.78%;总体发电量比虚拟阻尼控制降低 200 kW·h,比无阻尼控制降低 700 kW·h,但该部分发电量损失在机组 20 年的生命周期内可忽略。

该研究结果为大兆瓦双馈型风力发电机组传动链的扭振抑制提供了新的控制思路,为大兆瓦风电机组的功率与载荷协同控制提供了数据支撑。

[参考文献]

- [1] SHENG S. Report on wind turbine subsystem reliability a survey of various databases[R]. America: National Renewable Energy Laboratory, 2013.
- [2] 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 doubly fed wind turbine shafting[J]. Thermal Power Generation, 2020, 49(7): 35-40.
- [3] 白聪儿,孙哲杰,秦美娟,等. 风电机组传动链动力响应特性与支撑系统影响[J]. 浙江大学学报(工学版), 2023, 57(6): 1165-1174.
BAI Conger, SUN Zhejie, QIN Meijuan, et al. Dynamic response characteristics of wind turbine drive train and influence of support system[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2023, 57(6): 1165-1174.
- [4] 王爽,田德,唐世泽,等. 基于二自由度控制的风电机组传动链载荷优化研究[J]. 风能, 2020, 130(12): 62-68.
WANG Shuang, TIAN De, TANG Shize, et al. Research on load optimization of wind turbine drive train based on two degrees of freedom control[J]. Wind Energy, 2020, 130(12): 62-68.
- [5] 庞辉庆,邓英,刘茜,等. 基于卡尔曼滤波的风电机组传动链扭振控制[J]. 太阳能学报, 2020, 41(11): 293-299.
PANG Huiqing, DENG Ying, LIU Qian, et al. Torsional vibration control of wind turbine drive train based on Kalman filter[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2020, 41(11): 293-299.

- [6] 王智超,王瑛玮,孙然,等. 考虑风电机组传动链疲劳载荷的常态化惯量响应方法[J]. 节能技术, 2023, 41(1): 93-97.
WANG Zhichao, WANG Yingwei, SUN Ran, et al. Inertia response method considering fatigue load of wind turbine drive train[J]. Energy Conservation Technology, 2023, 41(1): 93-97.
- [7] 任坤涛. 浮式风电机组传动链扭振抑制自抗扰控制策略研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2022: 1.
REN Kuntao. Research on active disturbance rejection control strategy for torsional vibration suppression of floating wind turbine drive train[D]. Chongqing: Chongqing University, 2022: 1.
- [8] 蔡润泽,孟岩峰,胡书举. 基于改进自抗扰控制的双馈式风电机组传动系统扭振抑制策略[J]. 可再生能源, 2020, 38(3): 333-339.
CAI Runze, MENG Yanfeng, HU Shuju. Torsional vibration suppression strategy of doubly fed wind turbine drive train based on improved auto-disturbance-rejection control[J]. Renewable Energy Resources, 2020, 38(3): 333-339.
- [9] 欧阳敏南,李录平,樊昂,等. 双馈风电机组轴系扭振理论与扭振控制技术研究进展[J]. 电站系统工程, 2022, 38(1): 1-7.
OUYANG Minnan, LI Luping, FAN Ang, et al. Research progress of torsional vibration theory and torsional vibration control technology for doubly fed wind turbines[J]. Power System Engineering, 2022, 38(1): 1-7.
- [10] 雷航,刘河生,张瑞刚,等. 基于单纯形法的风电机组独立变桨控制技术与仿真[J]. 热力发电, 2023, 52(3): 144-150.
LEI Hang, LIU Hesheng, ZHANG Ruigang, et al. Research and simulation of wind turbine individual pitch control technology based on simplex method[J]. Thermal Power Generation, 2023, 52(3): 144-150.
- [11] YAN J H, FENG Y, DONG J N. Study on dynamic characteristic of wind turbine emulator based on PMSM[J]. Renewable Energy, 2016, 97: 731-736.
- [12] GIRSANG I P, DHUPIA J S, MULJADI E, et al. Gearbox and drive train models to study dynamic effects of modern wind turbines[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2014, 50(6): 1-10.
- [13] STRUGGL S, BERBYUK V, JOHANSSON H. Review on wind turbines with focus on drive train system dynamics[J]. Wind Energy, 2014, 18(4): 567-590.
- [14] 秦世耀,李少林,王瑞明,等. 风电机组传动链柔性建模及电网故障响应特性研究[J]. 太阳能学报, 2015, 36(3): 727-733.
QIN Shiyao, LI Shaolin, WANG Ruiming, et al. Study on flexible modeling of wind turbine drive train and dynamic response of grid fault[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2015, 36(3): 727-733.
- [15] MASOUD K, VAFA M. A review on Kalman filter models[J]. Archives of Computational Methods in Engineering, 2022, 30(1): 5.
- [16] SMYTH A, WU M. Multi-rate Kalman filtering for the data fusion of displacement and acceleration response measurements in dynamic system monitoring[J]. Mechanical Systems & Signal Processing, 2007, 21(2): 706-723.

(责任编辑 杨嘉蕾)