

考虑剪切风的迭代学习桨距角控制策略研究

卢爽瑄, 史航

(沈阳工程学院电气工程系, 辽宁 沈阳 110136)

摘要: 为实现风力发电系统的功率输出及电动机转速稳定控制, 基于迭代学习控制策略 (ILC) 设计了一种控制律, 并将其应用于叶片桨距角控制。该控制器可以抑制风剪切作用下的周期性扰动, 减少桨距角执行机构的动作频率, 降低机械载荷, 同时使电动机转速快速跟踪期望值, 实现功率稳定输出。在 MATLAB/Simulink 中建立了风电机桨距角调节系统仿真模型, 并与简单的迭代学习算法控制器以及传统 PID 控制器对比, 仿真结果表明, 针对具有重复特性的剪切风所带来的周期性扰动, 设计的桨距角控制器对扰动的抑制作用相比于普通迭代学习和传统 PID 控制器更好, 从而实现控制目的。

关键词: 风力发电系统; 变桨控制; 功率水平控制; 转速控制; 迭代学习; 周期性扰动

Study on iterative learning pitch angle control strategy considering shear wind

LU Shixuan, SHI Hang

(Electrical Engineering Department, Shenyang Institute of Engineering, Shenyang 110136, China)

Abstract: In order to achieve the power output and motor speed stability control of wind power generation system, a control law based on iterative learning control (ILC) strategy is designed and applied to the blade pitch angle control. The controller can suppress the periodic disturbance under the action of wind shear, reduce the action frequency of the pitch angle actuator, reduce the mechanical load, and make the motor speed quickly track the expected value to achieve stable power output. In MATLAB / Simulink, the simulation model of pitch angle regulation system of wind turbine unit is established, and compared with simple iterative learning algorithm controller and traditional PID controller, the simulation results show that the pitch angle controller designed in this paper is better than the ordinary iterative learning and traditional PID controller to suppress the periodic disturbance caused by the shear wind with repetitive characteristics, so as to achieve the control purpose.

Key words: wind power generation; pitch control; power level control; speed control; iterative learning; periodic disturbance

0 引言

近年来, 随着风力发电的广泛应用, 变桨控制作为风电控制系统的核心技术之一受到业内人士的关注^[1]。目前, 国内外对风电系统功率水平控制的研究较多采用桨距角调节, 实现风电系统的恒功率输出, 保证系统的安全运行。变桨距控制通过对空气动力载荷的直接控制调节风轮转

速, 进而通过传动系统以及发电机模块对输出功率进行调节。由于风机模型具有强非线性, 直接对非线性被控系统进行控制器设计较为困难, 若对风机系统进行线性化, 被控系统模型较易搭建且控制器的设计也变得简单, 控制效果更理想^[2]。传统PID控制技术以结构简单、技术成熟广泛应用于变桨控制, 但风电场内风速的随机性

导致功率输出不能较好地稳定在额定值附近, 控制效果不理想^[3-5]。文献[6]通过独立变桨控制来降低风轮不均匀载荷, 该方法目的在于调整各桨叶使其攻角相同, 但在实际应用中较难实现。文献[7]以5 MW变速变桨距风电机组为研究对象, 在风速高于额定值时, 设计了一种基于观察器的桨距角控制输入和发电机扭矩控制器。基于观察器的控制器跟踪最佳桨距角, 从而最大限度地减少空气动力相对于额定值的二次方误差, 通过仿真分析证明了所设计控制器的可行性。文献[8]提出了一种新的智能遗传算法(IGA)来调整常规PID的参数。与传统遗传算法相比, IGA增加交叉点值和变异率, 以提高迭代极限数, 从而获得优化参数。文献[9-12]结合了变桨控制和扰动调节控制, 扰动观测器用于估算风速, 风力机转速和风速之间的变化量决定桨距角, 但运行点的偏离会导致控制器性能降低, 从而影响仿真结果的准确性。

风速的随机性导致桨距角变换频繁, 不仅加剧了载荷, 对风机输出功率稳定性也造成威胁。重复控制理论针对此问题有很好的实际应用性, 并在多个领域得到验证^[13]。文献[14]基于线性化风力发电机模型, 设计了一种基于定量反馈理论的桨距角鲁棒控制器和基于重复控制理论的桨距角补偿控制器的循环变桨控制方案, 结果表明该方案具有很好的鲁棒性, 同时可以抑制周期性扰动下转速的高频脉动。文献[15]结合风速检测技术和重复控制理论实现桨距角控制, 考虑到周期性扰动的影响, 具有较强的实际意义。文献[16]基于重复控制器添加了并联滤波器, 实现了联合桨距角控制, 不仅减弱了风速扰动带来的影响, 传动链运行稳定性也得到了保障。试验结果表明该控制器有良好的抑制扰动能力, 并且有效保证了风力机输出功率稳定。文献[17]设计了基于线性白抗扰控制器和扰动调节控制器的独立变桨距控制器, 对风力机的不可知干扰进行了估计和补偿, 同时对结合风剪切效应的随机风速进行了抑制。在此基础上设计了准确度更高的非线性自抗扰控制器, 简化了控制器结构, 实现了参数的在

线整定。文献[18]考虑到风剪切和塔影效应, 采用无模型自适应控制策略实现风机的独立变桨距控制, 旨在降低不同风速的气动载荷引起的不平衡载荷对风机运行的不良影响。

迭代学习算法^[19-24]同样适用于随机性较强的风速变化。针对桨距角这一具有重复运行特性的被控对象, 旨在有限时间内使得实际输出快速零误差跟踪期望值。

本文基于迭代学习控制算法, 考虑风剪切效应下的周期性扰动设计桨距角控制律, 实现系统的稳定快速跟踪。该算法控制简单, 物理意义更加直观, 易于工程实现。

1 风力发电系统数学模型

1.1 气动效应分析

流体力学指出, 气流的动能表示为

$$E = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}\rho Sv^3 \quad (1)$$

式中, ρ 为空气密度; S 为气流横截面积; m 为单位之内流过横截面的空气质量。

贝茨理论指出, 风轮吸收的可转化为机械能的风能可以用风轮前后风能变化量表示, 上游风速为 v_1 , 下游风速为 v_2 , 表达式为

$$\begin{aligned} E &= \frac{1}{2}mv_1^2 - \frac{1}{2}mv_2^2 = \frac{1}{2}\rho Sv(v_1^2 - v_2^2) \\ &= \frac{1}{2}\rho Av(v_1^2 - v_2^2) \end{aligned} \quad (2)$$

风轮受到的力用风能和风速表示为

$$F = \frac{E}{v} = \frac{1}{2}\rho A(v_1^2 - v_2^2) \quad (3)$$

风轮受到的力还可以用单位时间内通过风轮的气流量差表示为

$$F = mv_1 - mv_2 = \rho Av(v_1 - v_2) \quad (4)$$

联立式(3)和式(4)得

$$v = \frac{v_1 + v_2}{2} \quad (5)$$

将式(5)代入式(2)得

$$E = \frac{1}{4}\rho A(v_1 + v_2)(v_1^2 - v_2^2) \quad (6)$$

若 v_1 已知, 则 E 是 v_2 的函数, 求导后得 $v_2 = v_1/3$, 将其代入式 (6) 得

$$E_{\max} = \frac{8}{27} \rho A v_1^3 \quad (7)$$

风力机吸收风能理论最大效率为

$$\eta_{\max} = \frac{E_{\max}}{\frac{1}{2} \rho A v_1^3} = \frac{16}{27} \approx 0.593 \quad (8)$$

1.2 风剪切效应等效风速模型

风剪切效应定义为随着垂直高度的增加, 水平方位的风速也随之增大, 即同一个叶片的不同位置所受到的风速值不同, 造成这一现象的主要原因是大气运动变化和地表环境^[25]。

风剪切等效风速为

$$V_h = V_H \left(\frac{h}{H} \right)^\alpha \quad (9)$$

式中, V_H 为轮毂处风速, 常用平均风速代替; h 为采样点离地垂直高度; H 为轮毂处垂直高度; α 为地表粗糙度指数。

将式 (9) 用极坐标表示为

$$V_h(r, \theta) = V_H \left(\frac{r \cos \theta}{H} \right)^\alpha = V_H [1 + W(r, \theta)] \quad (10)$$

式中, $W(r, \theta)$ 为风剪切引起的周期性扰动; r 为采样点距轮毂中心的距离; θ 为采样点与轮毂中心和水平方向的夹角。

对式 (10) 中的 $W(r, \theta)$ 用三阶泰勒级数展开为

$$\begin{cases} W(r, \theta) = A \cos \theta + B (\cos \theta)^2 + C (\cos \theta)^3 \\ A = \alpha \frac{r}{h} \\ B = \frac{\alpha(\alpha-1)}{2} \left(\frac{r}{H} \right)^2 \\ C = \frac{\alpha(\alpha-1)(\alpha-2)}{6} \left(\frac{r}{H} \right)^3 \end{cases} \quad (11)$$

1.3 风力发电机能量传动系统模型

风力发电机能量传动系统模型结构如图1所示

示, 包括风轮、低速轴、变速箱、高速轴和发电机等。

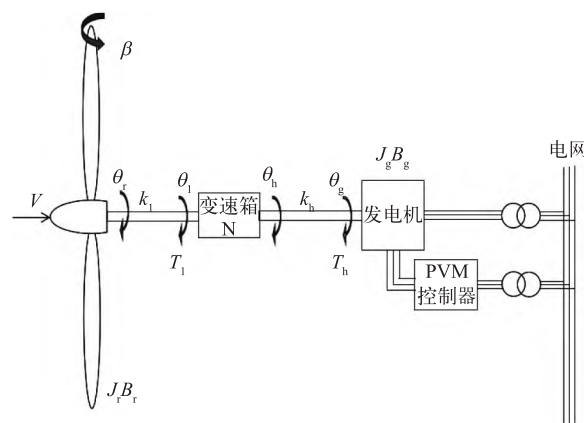


图1 风电能量传动系统结构示意图

Fig. 1 Structure diagram of wind power energy transmission system

风轮捕获风能输出的功率为

$$P = C_p \frac{1}{2} \rho A v^3 = C_p \frac{1}{2} \rho \pi R^2 v^3 \quad (12)$$

式中, C_p 为风机的风能利用系数, 是关于叶尖速比 λ 与桨距角 β 的函数。

由式 (12) 得出风机转矩数学模型为

$$T = \frac{P}{\omega} = \frac{C_p \frac{1}{2} \rho \pi R^2 v^3}{\omega} \quad (13)$$

式中, ω 为风轮旋转角速度; R 为风轮半径。

风轮气动转矩与发电机响应转矩的不平衡是导致传动轴转速变化的主要原因, 根据风力发电机组系统机理可知

$$\begin{cases} \theta_h = N \theta_l \\ T_l = N T_h \\ J_r \ddot{\theta}_r(t) + B_r \dot{\theta}_r(t) = T_v(t) - k_l [\theta_r(t) - \theta_l(t)] \\ J_g \ddot{\theta}_g(t) + B_g \dot{\theta}_g(t) = -T_e(t) - k_h [\theta_g(t) - \theta_h(t)] \\ T_l(t) = k_l [\theta_r(t) - \theta_l(t)] \\ T_h(t) = k_h [\theta_g(t) - \theta_h(t)] \end{cases} \quad (14)$$

经拉普拉斯变换并推导得

$$\begin{cases} \omega(s) = \frac{(J_g s^2 + B_g s + k) T_v - k N T_e(s)}{J_r J_g s^3 + (J_r B_g + J_g B_r) s^2 + (k J_r + k N^2 J_g + B_g B_r) s + (k B_r + k N^2 B_g)} \\ k = \frac{k_l k_h}{k_l + N^2 k_h} \end{cases} \quad (15)$$

式中, T_v 为风力发电机转矩; T_e 为电磁转矩; T_l 为低速轴转矩; T_h 为高速轴转矩; J_r 为转轴转动惯量; J_g 为发电机转动惯量; θ_l 为低速轴旋转角度; θ_h 为高速轴旋转角度; B_r 为粘性阻尼系数; B_g 为发电机粘性阻尼系数; k_l 为低速轴抗扭刚度系数; k_h 为高速轴抗扭刚度系数; ω 为风轮转速; N 为齿轮箱比; θ_r 为转轴旋转角度; θ_g 为发电机旋转角度。

1.4 发电机模型

本文以1.5 MW的风电机组为研究对象。加速齿轮箱低速传动轴传递到高速传动轴的机械能通过发电机完成电能的变换。选择通常用在兆瓦级风机中的双馈发电机, 定子绕组与电网相连接, 转子绕组经AC-AC变换器或AC-DC-AC变换器与电网相连接。

忽略转轴损耗, 根据能量守恒得知, 风力发电系统输出的功率可以用风轮转换得到的机械功率代替, 系统输出功率为发电机定转子有功之和, 公式为

$$P_{ot} = P_c = P_s + P_r \quad (16)$$

$$\begin{cases} P_s = u_{sdq} i_{sdq}^T \\ P_r = sP_s = \left(1 - \frac{\omega_r}{\omega_1}\right) P_s \end{cases} \quad (17)$$

式中, P_{ot} 为传动轴机械功率; P_c 为发电机输出有功; P_s 为发电机定子侧输出有功; P_r 为发电机转子侧输出有功; u_{sdq} 为定子电压; i_{sdq} 为定子电流; s 为发电机转差率; ω_r 为转子电角速度; ω_1 为电网电角速度。

根据电机学原理, 可得三相异步发电机的转矩方程为

$$T_e = \frac{pm_1 U_1^2}{(P\omega_g - \omega_1) \left[r_1 - \frac{C_1 r_2 \omega_1}{P\omega_g - \omega_1} + (x_1 + c_1 x_2)^2 \right]} \quad (18)$$

式中, T_e 为电动机的转矩, 单位为 $N \cdot m$; p 为电动机极对数; U_1 为电网电压, 单位为 V ; ω_g 为电动机端角速度, 单位为 rad/s ; ω_1 为电动机同步转速, 单位为 rad/s ; C_1 为修正系数; r_1 与 r_2 分别为电动机定子绕组的电阻与漏抗, 单位为 Ω ; x_1 与

x_2 分别为电动机归算后转子绕组的电阻与漏抗, 单位为 Ω 。

1.5 变桨距执行机构模型

电气和液压变桨距执行机构是当前主流的风机变桨执行系统。前者构造简单, 性能好, 可分散布置, 应用于独立变桨距控制, 已广泛应用于商业风电机组; 后者响应速度快, 方便集中布置, 应用于统一变桨距控制, 但结构复杂, 存在漏油、阀芯卡涩的情况, 是不能广泛应用的最大阻碍。控制器所产生的给定参考桨距角与实际桨距角两者间的关系通过变桨执行机构来表征。由于系统本身存在时滞现象, 本文可将两者的动态关系简单地等效为一阶惯性环节, 动态行为用式(19)表示, 其控制框图如图2所示。

$$\dot{\beta} = \frac{1}{\tau} \beta_d - \frac{1}{\tau} \beta \quad (19)$$

式中, β 为实际桨距角; β_d 为给定桨距角; $\frac{1}{\tau}$ 为响应速度; β 的变化范围通常在 $0^\circ \sim 90^\circ$ 之间, 最高变化速率在 $\pm 10^\circ/s$ 内。

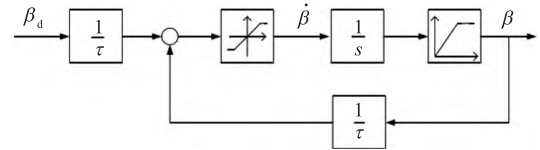


图2 变桨距执行机构框图

Fig. 2 Block diagram of variable pitch actuator

2 迭代学习控制研究

迭代学习的基本控制方法是: 利用上次迭代时的输入信息和输出误差得到本次控制信息, 经过多次迭代后, 被控对象以较高准确度跟踪期望轨迹。核心在于, 当被控系统存在重复运动特性时, 利用存储起来的控制经验进行重复控制, 适用于非线性系统, 尤其适用于具有重复特性的风机桨距角控制, 控制流程如图3所示。

迭代学习算法使用状态空间方法在时间域分析研究问题^[26], 假设被控对象状态方程为

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = f(t, x(t), u(t)) \\ y(t) = g(t, x(t), u(t)) \end{cases} \quad (20)$$

数学方式表述：在特定时间间隔($t \in [0, T]$)内，给定初始状态 $x(0)$ 下，式(20)在 $y(t)=y_d(t)$ 的解 $u_d(t)$ 存在。即存在 $u_d(t)$ 使得系统实际输出 $y(t)$ 可以快速追踪期望轨迹 $y_d(t)$ ，此时， $u(t) \rightarrow u_d(t)$ ， $y(t) \rightarrow y_d(t)$ 。

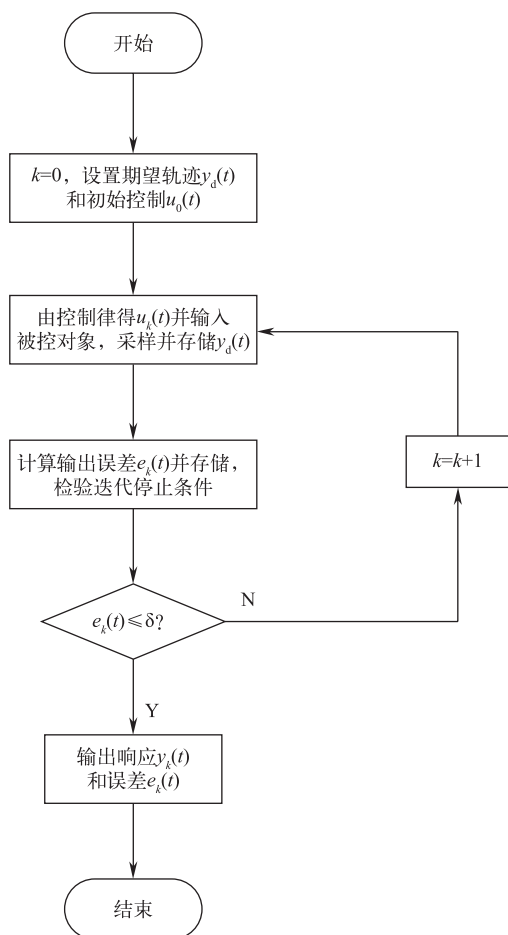


图3 迭代学习控制结构框图

Fig. 3 ILC structure diagram

经过 k 次迭代后，式(20)表示为

$$\begin{cases} x_k(t) = f(t, x_k(t), u_k(t)) \\ y_k(t) = g(t, x_k(t), u_k(t)) \end{cases} \quad (21)$$

开环迭代学习控制和闭环迭代学习控制是最常用的迭代学习控制算法。开环PID控制的方法利用上一次的控制输入信息和上一次的误差项作为本次迭代控制的输入信息，控制律为

$$u_{k+1}(t) = u_k(t) + k_p e_k(t) + k_i \int_0^t e_k(\tau) d\tau + k_d e_k(t) \quad (22)$$

式中， k_p 、 k_i 和 k_d 为学习增益。

开环PID型迭代学习控制结构如图4所示。

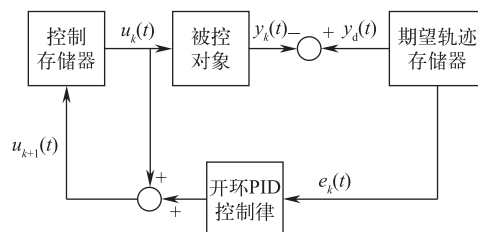


图4 开环PID型迭代学习控制结构框图

Fig. 4 Open-loop PID ILC structure diagram

开环PID控制只利用了上一次的控制信息和误差项，并没有利用本次误差反馈调整控制信息，但是迭代次数的增多同样可以实现对期望的跟踪，跟踪误差随之增大，在工程应用中不能达到较好的效果。闭环PID控制刚好弥补了这一缺陷，方法是利用上一次的控制输入信息和本次误差项作为本次迭代控制的输入信息，相比开环具有更好的收敛性和鲁棒性，控制律为

$$u_{k+1}(t) = u_k(t) + k_p e_{k+1}(t) + k_i \int_0^t e_{k+1}(\tau) d\tau + k_d e_{k+1}(t) \quad (23)$$

控制结构如图5所示。

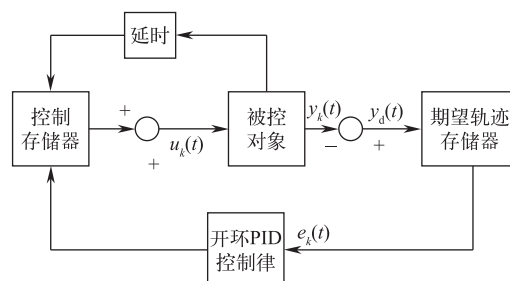


图5 闭环PID型迭代学习控制结构框图

Fig. 5 Closed-loop PID ILC structure diagram

开环迭代学习只利用上一次经验，闭环迭代学习只利用本次经验，虽然都能实现跟踪效果，但都有不足之处。本文提出开闭环控制律，同时利用前次和上次经验，达到更好的收敛和跟踪效果。

3 基于迭代学习算法的桨距角控制策略

本文采用迭代学习PID控制方法对风电机组功率输出进行优化控制，通过迭代学习PID控制良好的自适应能力，保证系统鲁棒性的同时，使系统的目标跟踪调节时间达到最优。面对风电功率的随机性以及波动性，将发电机期望转速与

实际转速的差值作为反馈信号,使风电机组更好地快速平滑风电输出功率,使风电输出功率按照计划输出,减少对电网的冲击,确保电网的长期稳定安全运行,控制框图如图6所示。

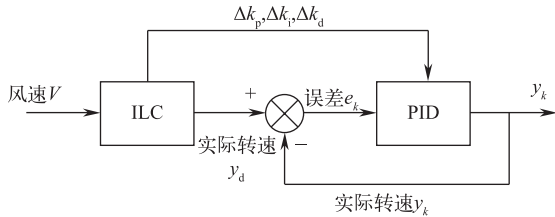


图6 迭代学习控制系统框图

Fig. 6 Block diagram of ILC control system

3.1 系统状态方程

由文献[27]可知风力机组动态方程线性化模型为

$$J \frac{d\omega}{dt} = k_\beta \Delta\beta + k_v \Delta v + k_\omega \Delta\omega \quad (24)$$

$$\text{其中, } \begin{cases} k_\beta = \frac{1}{2} \rho A v_{op}^2 \frac{\partial C_T}{\partial \beta} \Big|_{op} \\ K_v = \frac{1}{2} \rho A v_{op} \left[2C_T \Big|_{op} - \lambda_{op} \frac{\partial C_T}{\partial \lambda} \Big|_{op} \right] \\ K_\omega = \frac{1}{2} \rho A v_{op}^2 \frac{\partial C_T}{\partial \omega} \Big|_{op} \end{cases}$$

结合迭代学习设计,将式(24)表示为

$$J\dot{\omega} = a\beta + bv + c\omega \quad (25)$$

令桨距角用电压表示为 $\beta = \mu V$, μ 为某一常数,代入式(25),并考虑到系统扰动,得

$$J\dot{\omega} = a(\mu V) + bv + c\omega + \psi \quad (26)$$

由式(26)推导得

$$V = \frac{J\dot{\omega} - bv - c\omega - \psi}{a\mu} \quad (27)$$

令 $V^c = \frac{J\dot{\omega}^* - Jk_0 e - c\omega}{a\mu}$, 与式(27)对比得

$$J\dot{\omega} - \psi = J\dot{\omega}^* - Jk_0 e \quad (28)$$

令误差 $e = \omega - \omega^*$, 则

$$J\dot{e} = J(\dot{\omega} - \dot{\omega}^*) \quad (29)$$

联立式(28)和式(29),且令 $\psi = J(\dot{e} + k_0 e) = 0$,解得 $e \rightarrow 0$,所以 $V^c = \frac{J\dot{\omega}^* - Jk_0 e - c\omega}{a\mu}$

可行。

由文献[28]知,控制电压由传统控制电压和迭代学习补偿电压两部分组成,即

$$V = V^c + V^m \quad (30)$$

将 V^c 代入并化简得

$$J\dot{\omega} - \psi = J\dot{\omega}^* - Jk_0 e + a\mu V^m \quad (31)$$

理想状态下,可得状态方程为

$$J\dot{\omega} = J\dot{\omega}^* - Jk_0(\omega - \omega^*) + a\mu V^m \quad (32)$$

代入风机数据 $J=1281 \text{ kg/m}$ 、 $c=304.9 \text{ N}\cdot\text{s}$ 、 $a=163.3 \text{ N}\cdot\text{m/deg}$ 、 $\mu=7.2 \text{ deg/V}$ 、 $T=0.1 \text{ s}$ 、 $k_0=6$ 。得状态方程

$$\dot{\omega} = -6\omega + 6\omega^* + \dot{\omega}^* + 0.92u_k \quad (33)$$

3.2 迭代学习控制律

本文选用开闭环联合迭代控制器,设计控制律为

$$V_k^m = AV_{k-1}^m + B\dot{e}_{k-1} + Ce_k \quad (34)$$

用 $V = V^c + V^m$ 减去 $V^c = \frac{J\dot{\omega}^* - Jk_0 e - c\omega}{a\mu}$ 并代入式

(26)化简得

$$\dot{e} = -k_0 e + \tilde{\psi} + \frac{a\mu V^m}{J} \quad (35)$$

其中, $\tilde{\psi} = \frac{\psi}{J}$,对式(35)离散化可得

$$\begin{aligned} e_{k+1} &= (2 - k_0 T)e_k + (k_0 T - 1)e_{k-1} + \\ &T(\tilde{\psi}_k - \tilde{\psi}_{k-1}) + T \frac{a\mu}{J}(V_k^m - V_{k-1}^m) \end{aligned} \quad (36)$$

将式(34)代入式(35),满足

$$\begin{cases} (2 - k_0 T)e_k + T \frac{a\mu}{J} C e_k = 0 \\ (k_0 T - 1)e_{k-1} + T \frac{a\mu}{J} B e_{k-1} = 0 \\ A - 1 = 0 \end{cases}$$

时,有 $e_{k+1} = T(\tilde{\psi}_k - \tilde{\psi}_{k-1})$ 。

由文献[29]知

$$|e_{k+1}| = |T(\tilde{\psi}_k - \tilde{\psi}_{k-1})| \leq T^2 \max_{t \geq 0} \left| \frac{d\tilde{\psi}}{dt} \right| \leq T^2 c_0 \quad (37)$$

解方程组得 $C=15.25$ 、 $e_{k-1} = e^{\frac{0.4}{0.092B}t}$,取 $B=0.435$ 时, e_{k-1} 快速收敛。

所以,本文设计的控制律为

$$u_k = u_{k-1} - 0.435\dot{e}_k + 15.25e_{k-1} \quad (38)$$

4 仿真及结果分析

结合系统状态方程和控制律,在MATLAB/Simulink中搭建迭代学习桨距角控制器。

本文重点考虑了由于风剪切效应引起的周期性扰动对风机转速的影响。根据文献[30],发电机期望转速模型表示为

$$\omega_r^* = \frac{\omega_0}{1 + e^{-\frac{1}{2}(v(t)-\tau)}} \quad (39)$$

式中, ω_0 为平均风速下的转速; $v(t)$ 为风速曲线; τ 为时间常数,取2.5。

图7~图10为示波器输出响应曲线,采样时间为10 s,仿真步长取 5×10^{-5} 。输出曲线分别对应考虑周期性扰动的剪切风曲线、发电机期望转速随时间变化曲线、误差随迭代时间变化曲线以及实际转速对期望转速的跟踪曲线。

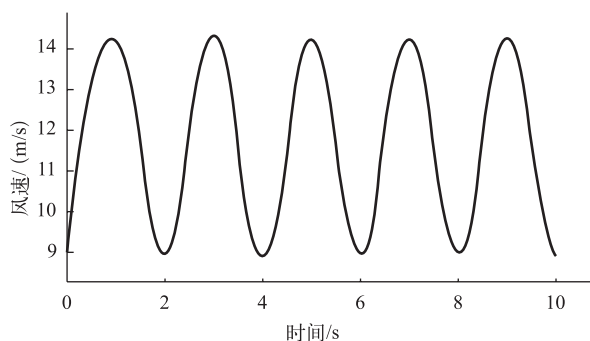


图7 剪切风响应曲线

Fig. 7 Shear wind response curve

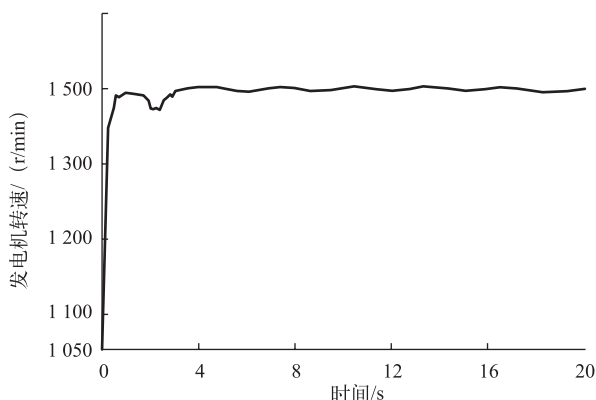


图8 发电机期望转速响应曲线

Fig. 8 Expected speed response curve of generator

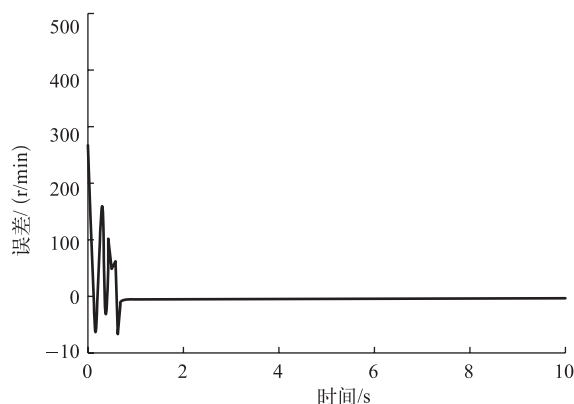


图9 转速误差响应曲线

Fig. 9 Speed error response curve

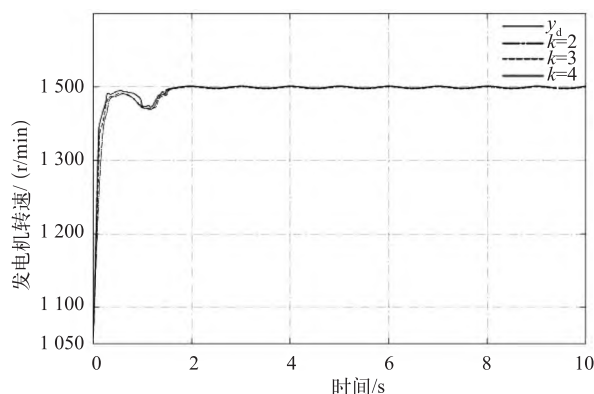


图10 转速跟踪响应曲线

Fig. 10 Speed tracking response curve

图7中,风轮扫掠面中心位置风速为11.5 m/s,选取距叶尖1 m处为采样点,对剪切风进行模拟。可以看出,当风力机叶片以接近额定转速旋转时,叶片上固定点受到的风速变化值是随叶片旋转位置周期性变化的,当叶尖竖直向下即在0 s时,风速最小为9 m/s;当叶尖竖直向上即在1 s时,风速最大为14 m/s。由图9可见,系统误差在很短时间(2 s)减小至0附近。在控制过程中,调节比例可对系统稳态误差的减小做出贡献,从而提高控制准确度。由图10看出,在施加剪切风之后,由迭代算法控制的发电机输出转速从1.5 s开始实现了对期望轨迹的跟踪,在2.5 s时实际转速达到1 500 r/min,并稳定在较小范围内。随着迭代时间的推移,转速曲线逐渐趋于期望轨迹。

为突出本文设计的开闭环联合迭代控制律

的优越性,经计算得出开闭环P型迭代学习控制律为 $u_k = u_{k-1} - 18.44e_{k-1} + 6.15e_{k-2}$,状态方程为 $\dot{\omega} = -6\omega + 6\omega^* + \dot{\omega}^* + 0.92u_k$ 保持不变,仿真结果如图11、图12所示。

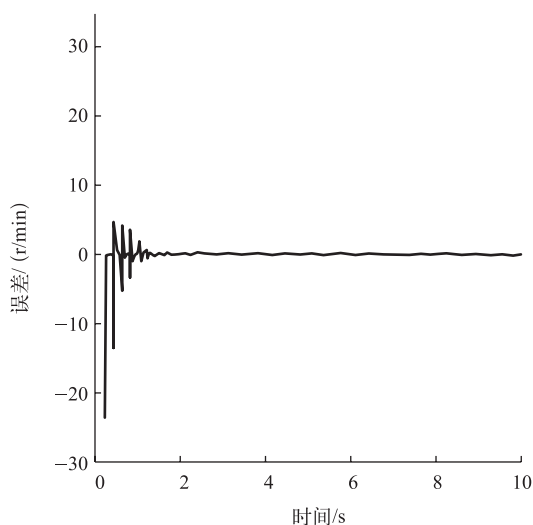


图 11 转速误差响应曲线

Fig. 11 Speed error response curve

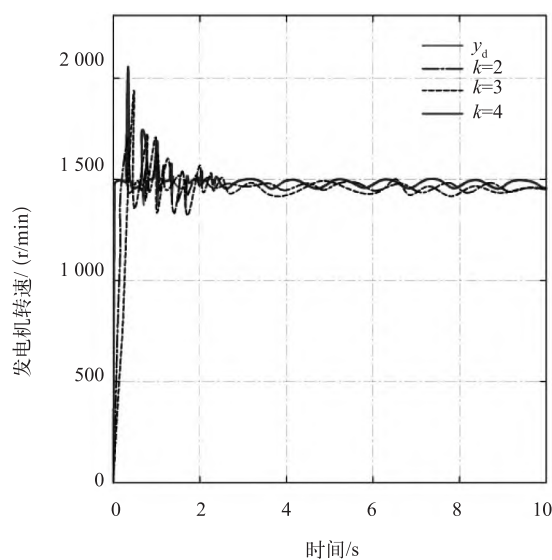


图 12 转速跟踪响应曲线

Fig. 12 Speed tracking response curve

对比图9和图11、图10和图12可知,开闭环P型控制律作用下的发电机转速在4 s开始实现了对期望轨迹的跟踪,在6 s后稳定在较小范围,其收敛速度和跟踪效果不及本文设计的开环D、闭环P联合迭代学习控制。

此外,在MATLAB/Simulink中搭建PID

控制器对桨距角进行控制,输出波形如图13所示。以1.5 MW风电机组为研究对象,参数为桨叶半径 $R=35$ m、空气密度 $\rho=1.225$ kg/m³、切入风速 $V_a=3.5$ m/s、切出风速 $V_b=25$ m/s、额定风速 $V_N=11.5$ m/s、风机转动惯量 $J_f=3.86 \times 10^6$ kg·m²、风机额定转速 $\omega_0=17.2$ r/min、发电机转动惯量 $J_g=80$ kg·m²、齿轮箱变比 $N=100$ 、发电机额定转矩 $T_e=8\,712$ N·m、发电机额定功率 $P_e=1\,500$ kW。

通过调整PID控制器调节参数,取 $k_p=0.000\,1$ 、 $k_i=0.000\,7$ 、 $k_d=0.000\,01$ 。

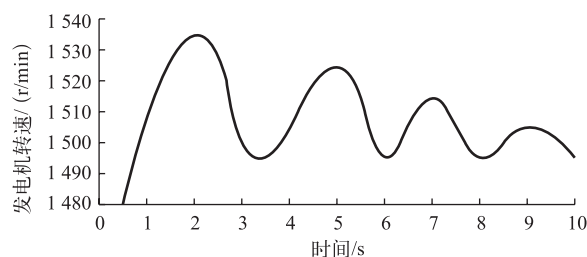


图 13 风力发电机转速响应曲线

Fig. 13 Speed response curve of wind turbine

由图13看出,响应速度较慢,振荡幅度较大,收敛速度较慢,在6 s时其转速才开始收敛并稳定在一定值附近,但波动幅度仍较大,稳定后转速极值差限定在10 r/min左右。通过改变PID控制器的参数($k_p=0.000\,7$, $k_i=0.003$, $k_d=0.000\,1$)可提高收敛速度和收敛效果,如图14所示。

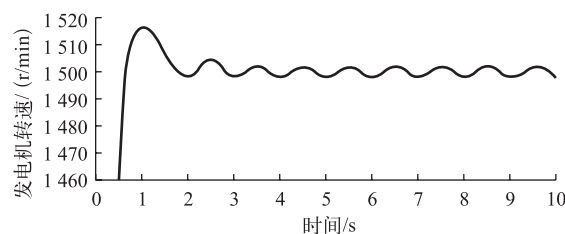


图 14 风力发电机转速响应曲线

Fig. 14 Speed response curve of wind turbine

考虑到PID控制调节过程过于烦琐,针对不同的风况需要设计不同的控制参数,计算速度慢,不能很好地适应风速的不确定性,当风速变化较大时,控制效果不显著。本文设计的迭代控制器能快速稳定转速在较小范围内,对风剪切作

用带来的周期性扰动有很好的抑制作用,对变化的被控对象有很好的控制效果。

综上所述,本文设计的开闭环联合迭代学习控制器不仅使输出结果快速收敛,计算速度快,而且能抑制风剪切效应带来的周期性扰动影响,收敛效果可观,具有工程意义。

5 结束语

本文的具体工作主要体现在以下几个方面。

1) 从风速出发,分析了风切变效应对风力机造成的影响,通过搭建风力发电机模型,在这个基础上设计了传统PID控制器应用到桨距角控制,并在MATLAB/Simulink上进行了仿真。结果表明对于剪切风作用下,传统PID控制器虽然可以减小剪切风带来的周期性扰动,但控制效果好坏依赖于参数的选取,对于整定好的调节参数不能进行在线实时修正,其适用性受到限制。

2) 针对剪切风带来的周期性扰动,设计了开环D型、闭环P型的开闭环联合迭代学习控制器。将系统本次和上次运行信息结合,对当前控制信息进行共同修正。在风力机的变桨距控制系统上进行了仿真。结果表明,该控制器能够较好地完成变桨控制任务,且对剪切风带来的周期性扰动有良好的抑制效果,明显优于传统PID控制器。

风的强随机性和不稳定性决定了风力机组的控制系统是一个复杂的非线性系统。风力机的动态模型很难精确建立。ILC算法结构简单,适合被控对象具有可重复性和快速变化的被控系统。具有记忆储存功能,当控制任务发生改变时,不需要重新建立控制器。迭代学习控制算法正适合风力机的控制系统。

就目前发表的文献中,系统每次运行的初始状态都进行限制之后再验证算法的收敛性。这只是理想的情况。但在实际系统中,零初始偏差是很难做到的;如何兼顾迭代学习控制的收敛性和收敛速度也是一个问题。可以用两种办法来提高收敛速度:一是重构初始状态;二是设计更合适的ILC算法。设计出一种不需要系统具有可重复

性,可以更广泛应用的迭代学习控制器是今后的研究方向。其次,本文所设计的迭代学习控制器对于不同装机容量的风电机组未进行横向对比,适用性有待进一步验证。

参考文献

- [1] 秦生升. 风力发电机组变桨距控制技术综述[J]. 电器制造, 2010(9): 42-44.
- [2] 耿华, 杨耕. 变速变桨距风电系统的功率水平控制[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(25): 130-137.
- [3] 张真源, 刘国荣, 杨小亮, 等. 基于RBF神经网络的参数自适应PID变桨控制器的设计[J]. 电力系统及其自动化学报, 2020, 32(5): 16-23.
- [4] 李飞飞. 基于双模糊PID控制策略的风力发电机组变桨系统研究[J]. 模糊系统与数学, 2019, 33(3): 29-34.
- [5] 周杨, 赵毅君, 赵耀, 等. 一种基于滑模自抗扰控制器的风电机组变桨距控制策略[J]. 湖南工程学院学报, 2022, 32(1): 36-41.
- [6] LARSEN T J, MADSEN H A, THOMSEN K. Active load reduction using individual pitch, based on local blade flow measurements[J]. Wind Energy, 2005, 8(1): 67-80.
- [7] CORRADINI M L, IPPOLITI G, ORLANDO G. An observer-based blade pitch controller of wind turbines in high wind speeds[J]. Control Eng. Pract., 2017, 58: 188-192.
- [8] CIVELEK Z, ÇAM E, LÜY M, et al. Proportional-integral-derivative parameter optimisation of blade pitch controller in wind turbines by a new intelligent genetic algorithm[J]. IET Renew Power Generat, 2016, 108(8): 1220-1228.
- [9] 李建林, 许洪华. 风力发电系统低电压运行技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2009.
- [10] STOL K, RIGNEY B, BALAS M. Disturbance accommodating control of a variable-speed turbine using a symbolic dynamics structural model[C]. Reno: The 2000 ASME Wind Energy Symposium,

- 2000.
- [11] BALAS M J, WRIGHT A, HAND M, et al. Dynamics and control of horizontal axis wind turbines[C]. Denver: The American Control Conference, 2003.
- [12] 叶杭冶. 风力发电机组的控制技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2002.
- [13] 李翠艳, 张东纯, 庄显义. 重复控制综述[J]. 电机与控制学报, 2005, 9(1): 37-44.
- [14] 卢爽瑄. 风力发电机组动力模型及循环变桨控制策略研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2012.
- [15] 张忠财. 风力机风速检测与变桨控制策略研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2019.
- [16] 卢爽瑄, 张忠财, 郑金雨. 大型风力机桨距角补偿控制策略研究[J]. 科技创新导报, 2017, 36: 94-95.
- [17] 刘素. 基于自抗扰的风力发电机独立变桨距控制策略研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2018.
- [18] 付广振. 基于桨叶载荷的风力机独立变桨距控制[D]. 乌鲁木齐: 新疆大学, 2013.
- [19] 李仁俊, 韩正之. 迭代学习控制综述[J]. 控制与决策, 2005, 20(9): 961-966.
- [20] 丁伟杰. 迭代学习控制的算法研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2017.
- [21] 孔祥波, 郝晓弘. 迭代学习控制的研究与应用[J]. 甘肃科技, 2008, 24(7): 87-89.
- [22] 石成英, 林辉. 迭代学习控制的研究与应用进展[J]. 测控技术, 2004, 23(2): 1-3.
- [23] 张守伟. 迭代学习控制的应用研究[D]. 青岛: 中国石油大学, 2008.
- [24] 邹然. 迭代学习控制算法研究及其在风电控制系统中的应用[D]. 成都: 电子科技大学, 2009.
- [25] 熊礼俭. 风力发电新技术与发电工程设计、运行、维护及标准规范实用手册[M]. 北京: 中国科技文化出版社, 2005.
- [26] 于少娟, 齐向东, 吴聚华. 迭代学习控制理论及应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.
- [27] 林勇刚. 变速恒频风力机组变桨距控制系统[J]. 农业机械学报, 2004, 35(4): 110-114.
- [28] SONG Y D, Memory-based control of nonlinear dynamic systems[J]. IEEE, 2006: 124-129.
- [29] KREYSZIG E. Advanced engineering mathematics second edition, John Wdey & Sons Inc., 1968: 240-243.
- [30] LIAO X H, SUN Z. Variable speed control of wind turbines via memory-based firing angle sequence adjustment[J]. Journal of Solar Energy Engineering, 2008, 130: 137-142.

作者简介

卢爽瑄（1972—），男，副教授，硕士生导师，研究方向为电力电子与电力传动。

史航（1998—），男，硕士研究生，研究方向为风力发电变桨距控制。

（收稿日期：2022-11-14）