

基于 H_∞ 回路成形的风力发电机变桨距鲁棒控制

介绍了风力发电机组变桨系统的工作原理；并研究了风力发电机组变桨距控制机构的鲁棒 H_∞ 控制问题。针对风力发电系统中的变桨距控制系统选择权函数进行成形，然后利用 H_∞ 回路成形算法对成形后的系统设计鲁棒控制器，仿真结果表明，所提出的控制器具有良好的跟踪性能和鲁棒性。

沈 恂 黄金杰/哈尔滨理工大学自动化学院

孙文兵/中国矿业大学信息与电气工程学院



沈 恂/硕士研究生

为有效开发我国丰富的风力资源，必须对风力发电机组各部分进行改善优化。大规模风力发电机组技术的快速发展要求风力发电机既能有效捕获风能又要增强自身使用寿命。风力发电机的结构和控制都已渐渐完善，变桨距以其优越性在风力发电机组中占主导地位，其准确有效控制对整个风力发电机组起关键作用^[1-2]。因风力发电机组模型的不确定性及空气动力延迟、变桨恒功率要求变桨执行机构能够快速跟踪桨距角命令^[3-4]。本文依据 H_∞ 鲁棒控制理论，采用回路成形方法增强系统动态稳定，用规范化互质分解对系统非结构不确定性进行建模，设计鲁棒 H_∞ 回路成形变桨距控制器，仿真结果表明，所提出的控制器具有良好的跟踪性能和鲁棒性，响应过程对系统硬件也无损伤，受系统参数突变的影响比较小。

关键词/Keywords

风力发电机 ·

H_∞ ·

回路成形 ·

变桨距 ·

H_∞ 回路成形设计原理

H_∞ 回路成形设计方法 (Loop shaping design procedure, LSDP) 利用经典的回路成形原理来折衷对象性能和鲁棒稳定性。闭环系统的性能与开环系统奇异

值的形状有密切关系，可以通过选择适当的前/后补偿器，使补偿后的开环系统满足期望的奇异值形状。一般说来期望的开环形状在低频段有较高的增益；中频段的下降斜率一般为20 dB/dec比较理想；而高频段要有较快的下降速度。图1为期望回路成形示意图。

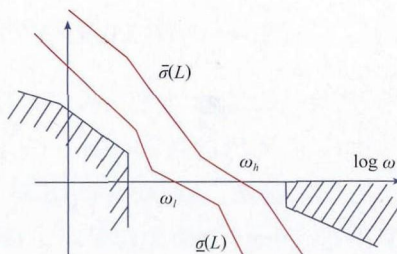


图1 期望回路形状

图1中 $L = KG$ 为开环回路形状。为提高性能，必须使系统在某个低频段满足下述不等式： $\underline{\sigma}(GK) \gg 1$ 、 $\underline{\sigma}(KG) \gg 1$ 、 $\underline{\sigma}(K) \gg 1$ 。要获得良好的鲁棒性和抗噪声性能，必须使其在某个高频段 (ω_h , ∞) 满足： $\overline{\sigma}(GK) \ll 1$ 、 $\overline{\sigma}(KG) \ll 1$ 、 $\overline{\sigma}(K) \ll 1$ ，其中 $\overline{\sigma}(\cdot)$ 和 $\underline{\sigma}(\cdot)$ 分别代表系统传递函数的最大和最小奇异值。

鲁棒稳定增益 ε 表示期望回路成形所具有的鲁棒性能，一般 $\varepsilon \leq 1$ ，实际工程经验中 ε 值为0.2~0.3，闭环系统可以实现较好的鲁棒性能。 $\varepsilon_{\max}$ 按照下式计算得到

$$\varepsilon_{\max} = \left(\inf_{K \text{ 镇定}} \left\| \begin{pmatrix} I \\ K \end{pmatrix} (I + G_s K)^{-1} M^{-1} \right\|_{\infty} \right)^{-1} \quad (1)$$

$$= \sqrt{1 - \|N - M\|_H^2} < 1$$

式中， M 和 N 为 G_s 的正规化互质分解。即

$G_s = \tilde{M}_s^{-1} \tilde{N}_s$ 、 $\tilde{M}_s^{-1} \tilde{M}_s + \tilde{N}_s^{-1} \tilde{N}_s = I$ 。对于一个被控对象 G ，左互质因子不确定性模型描述为

$$G_\Delta = (\Delta M + \Delta N)^{-1} (\Delta M + \Delta N) \quad (2)$$

式中， ΔM 、 ΔN 为被控对象 G 的左互质因子，即 $G = M^{-1}N$ ， $(\Delta M, \Delta N)$ 是未知的，但传递函数是稳定的不确定。

风电机组变桨距控制分析

1. 变桨距调节原理

根据贝茨理论，当风速 $V(\text{m/s})$ 轴向流过风力机时，风轮从风能中捕获的功率和气动转矩为

$$P_r = \frac{1}{2} C_p(\beta, \lambda) \rho \pi R^2 V^3 \quad (3)$$

$$T_r = \frac{1}{2} C_T(\beta, \lambda) \rho \pi R^3 V^2 \quad (4)$$

式中， P_r 为风轮吸收功率，W； T_r 为风轮气动转矩，N·m； C_p 为风能利用系数； C_T 为气动转矩系数； ρ 为空气密度， kg/m^3 ； $C_p(\beta, \lambda) = \lambda C_T(\beta, \lambda)$ ； β 为桨距角，deg； R 为风轮半径，m； λ 为叶尖速比， $\lambda = \frac{\omega_r R}{V}$ ； ω_r 为风轮转速，rad/s。

对于变桨距风力机， C_p 与 λ 和 β 成非线性关系， $C_p(\beta, \lambda)$ 近似为如下函数

$$C_p(\beta, \lambda) = 0.5176 \left(\frac{116}{\lambda_i} - 0.4\beta - 5 \right) e^{\frac{-21}{\lambda_i}} + 0.0068\lambda \quad (5)$$

变量 λ_i 定义为

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \quad (6)$$

图2为变桨距风电机组的 $(C_p - \beta)$ 特性曲线。

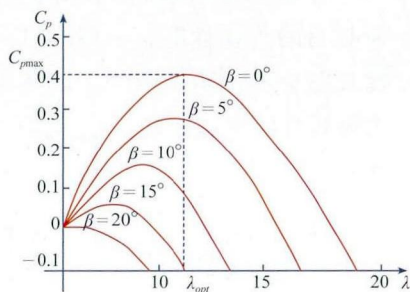


图2 风能利用系数 $(C_p - \beta)$ 曲线图

由图2可知，增大桨距角 β 可降低风能利用系

数 C_p ，当风机在额定风速以上运行时，能将风力发电系统的输出功率稳定在额定值附近，同时将风机转速限定在允许范围之内。

2. 变桨距执行机构模型

图3为变桨距控制系统框图，桨距给定参考值在发电机组并入电网前，由速度控制器A给出，并入电网后由速度控制器B给出。

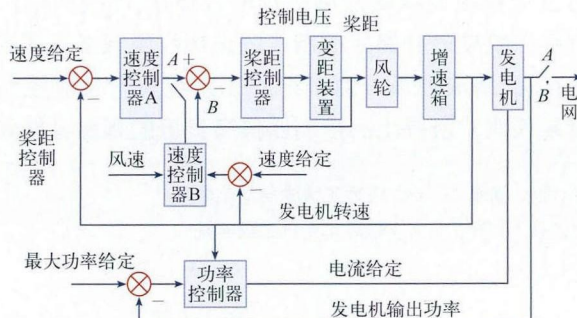


图3 变桨距控制系统框图

由于叶片转动惯量较大，为尽量减小变桨距执行机构消耗的功率，执行机构应具有一定的限制能力，其动态特性是在桨距角和桨距速率上均具有饱和限制的非线性动态，当桨距角和桨距速率小于饱和限度时，桨距动态呈线性。图4为变桨距执行机构。从变桨距控制器的桨距角指令到该指令的激励之间的动态过程可以等效为一阶惯性环节当风速超过额定风速时，应调节桨距角来限制输入气动功率，桨叶角度由一个机电调节器控制，该调节器的一阶模型为

$$\dot{\beta} = \frac{1}{\tau} (\beta_r - \beta) \quad (7)$$

式中， τ 为时间常数； β_r 为桨距角参考输入； β 为实际桨距角。

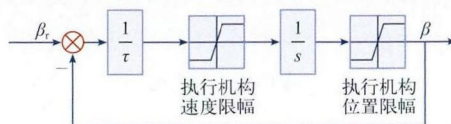


图4 变桨距执行机构模型

β 的范围为 $-2^\circ \sim 30^\circ$ ，以最大速率 $\pm 10^\circ/\text{s}$ 变化，功率调控可以要求快速且大幅度修正桨距角。从变桨距控制器的桨距角指令到该指令的激励之间动态过程可等效为一阶惯性环节，计算公

式为

$$G_{(s)} = \frac{\beta_{(s)}}{\beta_{r(s)}} = \frac{1}{\tau S + 1} \quad (8)$$

桨距 $H = 2\pi r \tan \beta$ 随 β 变化而变化,从而改变风力机转速 ω ,这就是风力机变桨距调节原理。

H_∞ 回路成形控制器设计与仿真

1. H_∞ 回路成形方法

确定期望对象奇异值曲线形状。在低频段,为保证系统鲁棒稳定,开环传递函数 L 的奇异值应尽量大,以使系统具有良好的输入跟踪能力和抗干扰能力;为抑制噪声信号 n ,则要求 L 的奇异值在高频段尽量小;在过渡频率段,为了保证闭环系统的稳定性,应使 L 的奇异值曲线斜率小于 -40 dB/dec。

首先,选取适当预补偿器 W_1 或后补偿器 W_2 ,将标称受控对象的奇异值成形为期望的开回路形状,成形后受控系统为 $G_s = W_2 G W_1$,且 G_s 没有隐藏的系统模式,即没有右半平面零极点抵消。图5为成形对象 G_s 和期望鲁棒控制器 K 。

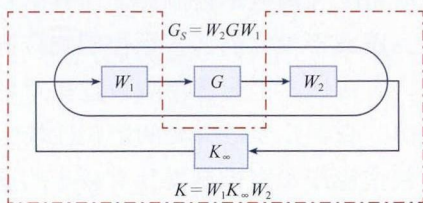


图5 成形对象 G_s 和期望鲁棒控制器 K

然后由式(1)计算 $\varepsilon_{\max}$,即 $b_{\text{opt}}(G_s) = (1/\varepsilon_{\max})$,若 $\varepsilon_{\max} \ll 1$,则重新调整 $W_1, W_2(\omega_h, \infty)$ 。选择适当 $\varepsilon \leq \varepsilon_{\max}$,组合 H_∞ 控制器 K_∞ 和成形权函数 W_1 和 W_2 , $K = W_1 K_\infty W_2$ 。控制器 K_∞ 满足

$$\left\| \begin{pmatrix} I \\ K_\infty \end{pmatrix} (I + G_s K_\infty)^{-1} \tilde{M}_s^{-1} \right\|_\infty \leq \varepsilon^{-1} \quad (9)$$

最后,检查所得闭环系统,验证系统的鲁棒性能;若必要,对所得系统进行调节。

2. 变桨距 H_∞ 回路成形控制器设计

(1) 回路成形权值阵选择

分析权函数参数与开环奇异值曲线的关系,由于变桨距归一化线性模型比较简单,本文采用

最简单的权函数形式 $W_1 = \frac{1}{as+b}$, $W_2 = c$, a 的值与开环加权系统中频斜率有关, a 减小则中频段斜率降低,也就是奇异值曲线下下降率降低; b 与奇异值曲线的起点分贝值有关(也就是在低频段的奇异值), b 减小则低频奇异值变大,也就是起点上升; c 的值也与奇异值的起点分贝值有关, c 变大,低频奇异值变大。其具体选择方法如下:

首先设定调整参数的初始值,判断开环系统奇异值在低频段是否远远大于1,若奇异值小于40则减小 b ,增大 c ;若奇异值大于40,再判断开环奇异值曲线中频下降斜率是否小于 -40 dB/dec,否则减小 a ;若满足则使系统奇异值曲线穿越频率为5 rad/sec时对应的分贝值在 ± 0.1 之间;若小于 -0.1 则减小奇异值曲线斜率即减小 a ;若大于 0.1 则增大奇异值曲线斜率即增大 a 。具体流程图如图6所示。

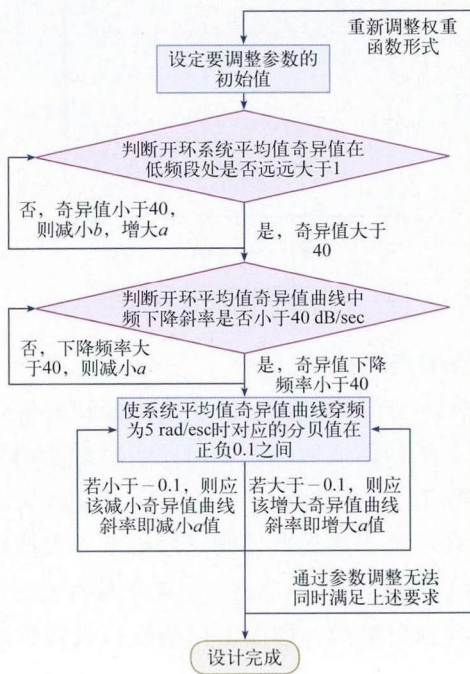


图6 权值阵选择流程图

(2) 控制器具体设计

本文选取的风力发电机组额定风速为11 m/s,发电机额定功率为1 000 kW,风轮额定转速为21.5 r,发电机额定转速为1 500 r,桨距角控制准确度为 0.2° 。对于变桨距控制系统, $\tau = 500 \mu\text{s}$,则标称受

控对象为 $G(s)=\frac{1}{5\times 10^{-4}S+1}$ ，系统为单输入单输出系统。为使系统获得良好指令跟踪能力和抗干扰能力，灵敏度函数在低频区（ $\omega\leq\omega_L$ ）的值要小，要符合所指定的频带宽度，利用加权函数调整奇异值。经过运行选择出权函数系数 $a=2.318$ ， $b=0.21$ ， $c=50$ 。

图7为加权后的回路形状 $Gs(s)=G(s)W_1(s)$ 与原期望的回路形状 $Gd(s)$ 的奇异值曲线，两者在中低频段上基本吻合。用Matlab的hinf函数求解可得按 H_∞ 范数优化的 H_∞ 鲁棒控制器为

$$K(s)=\frac{15.36s^2+720.52s+30.42}{s^3+12.24s^2+15.69s+49.28} \quad (10)$$

其与全阶模型 $G(s)$ 组成的闭环回路的稳定裕度为 $\varepsilon=0.2815$ ，可对其进行互质因式降阶。

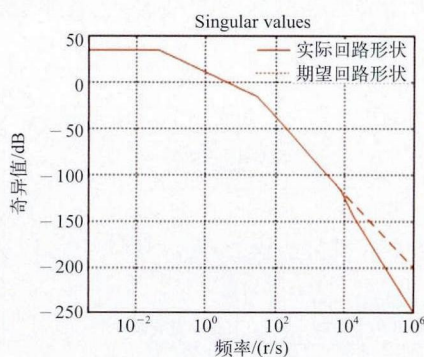


图7 加权成形后的开环回路形状

3. 仿真与分析

根据本文仿真需要，为便于比较和分析，同时进行了 H_∞ 回路成形控制和PI控制桨距角调节的仿真。图8为跟踪桨距角命令响应曲线。从调节过程上看， H_∞ 回路成形控制过程平滑，无振荡过程，PI控制过程出现明显振荡，对于具有延迟特性的桨距角执行机构，振荡不仅给执行机构带来硬

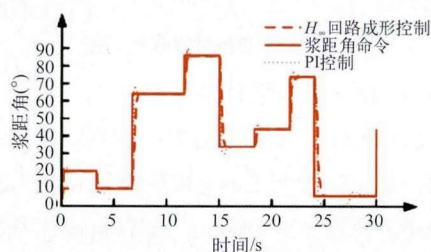


图8 跟踪桨距角命令

件上的损伤，且执行机构很难满足这种高灵敏性要求；从调节时间上看， H_∞ 回路成形控制调节时间明显小于PI控制。

由于时间常数的变化也可能影响到控制效果，本文在时间常数变动为 $0.8\tau\sim 1.2\tau$ 范围内，对 H_∞ 回路成形控制器的控制效果作了仿真。图9为 τ 变动时桨距角跟踪命令，由图可见，即使 τ 变动 $-20\%\sim 20\%$ ，鲁棒 H_∞ 控制器依然能使变桨执行机构的跟踪效果良好，其跟踪性能与 τ 变动前的差别不大。

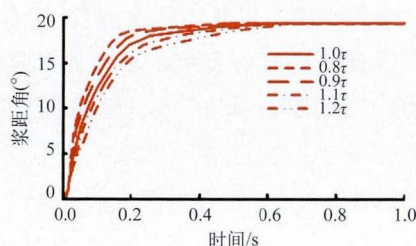


图9 τ 变动时桨距角跟踪命令

结束语

本文针对变速变桨风力发电系统变桨距机构，根据 H_∞ 回路成形鲁棒控制理论利用Matlab设计了桨距角 H_∞ 回路成形控制器。仿真结果表明，基于 H_∞ 回路成形设计的变桨距控制响应快，调节时间小，灵敏性高，无震荡响应过程对系统硬件也无损伤，受系统参数突变的影响比较小，显示出 H_∞ 回路成形变桨距控制器具有较好的适应性和鲁棒性。

参考文献

- [1] 刘鑫尚. 风力发电发展与现状分析 [J]. 新西部, 2012, (17): 58-60.
- [2] 孟彦京, 常杰, 朱玉国. 风力发电变桨控制系统设计 [J]. 电气传动, 2010, (5): 41-43.
- [3] 姚兴佳, 宋俊, 邢作霞, 等. 风力发电机组原理与应用 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2009.
- [4] Zhang Xinfang, Xu Daping, Liu Yibing. Intelligent control for large-scale variable speed variable pitch wind turbines [J]. Journal of Theory and Application, 2004, 2 (3): 305-311.

(收稿日期: 2015-03-07) **EA**