

模型参考自适应电动变桨距控制

张纯明, 姚兴佳, 张忠丛, 温和煦

(沈阳工业大学 风力发电研究所, 辽宁 沈阳 110023)

摘要: 根据模型参考自适应控制原理(MRAC), 以大型风力发电机组直流电动变桨距控制系统为研究对象, 设计一个高性能电动变桨距自适应控制系统, 并应用李雅谱诺夫稳定性分析法给出自适应系统控制律, 通过对所设计系统的性能进行了仿真分析, 分析结果表明所设计系统具有很好的跟踪性和伺服性.

关键词: 风力发电; 自适应; 电动变桨距; 永磁直流电动机

中图分类号: TM614 **文献标识码:** A

A model-reference adaptive blade-pitch control for a wind generator system

ZHANG Chun-ming, YAO Xing-jia, ZHANG Zhong-cong, WEN He-xu

(Wind Energy Institute of Shenyang University of Technology, Liaoning Shenyang 110023, China)

Abstract: Based on the model of a large-scale wind-generator with variable blade pitch, we proposed a model-reference adaptive control system for controlling the blade pitch, and discussed its design principles. We also carried out the simulations showing the robustness and servo-performance of the system.

Key words: wind power; adaptive; electric drive pitch; permanent magnet dc motor

1 引言(Introduction)

模型参考自适应控制(MRAC)具有良好的抗干扰和鲁棒控制性能, 尤其当系统模型表现为较强的非线性时, MRAC更体现出独特的控制性能. MRAC的控制原理为: 在满足系统动态性能要求的参考模型下, 将参考模型与被控对象并联, 在同一输入条件下比较两者的输出, 得到的偏差由自适应机构去调节被控对象的输入量, 直至偏差为零. 本文以永磁直流电动机变桨距控制系统为参考模型, 设计了一个模型参考自适应控制系统, 并结合李雅谱诺夫函数稳定性分析给出模型参考控制律. 最后, 通过仿真结果表明了所设计系统的有效性.

2 直流电动变桨距控制系统参考模型(Model of DC electrical drive pitch control system)

为适应大型风电机组的发展需求, 电动变桨距控制系统得到广泛的研究与应用. 其基本控制系统原理图如图1所示.

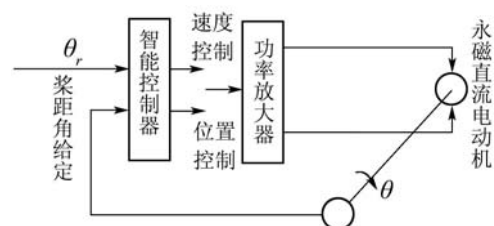


图 1 直流电动变桨距系统结构图

Fig. 1 Structure graph of DC electrical drive pitch control system

对于永磁直流电动机, 其数学模型为

$$\begin{cases} L_a \frac{di_a(t)}{dt} + R_a i_a(t) = e_a(t) - e_b(t), \\ e_b(t) = K_b \omega_M(t), \\ T_M(t) = K_T i_a(t), \\ J \frac{d\omega_M(t)}{dt} + B \omega_m(t) = T_M(t). \end{cases} \quad (1)$$

式中: K_b 为电动机反电动势常数; K_T 为电动机转矩常数; ω_M 为电动机转速; T_M 为电动机输出转矩; J 为

折算到电动机轴上的总惯量.

取上式的拉氏变换, 可求出闭环系统的传递函数模型为

$$\phi(s) = \frac{\theta_o(s)}{\theta_i(s)} = \frac{K_S K_A K_T}{R_a J s^2 + (K_b K_T + R_a B) s + K_S K_A K_T}. \quad (2)$$

3 直流电动变桨距自适应系统设计(Design of adaptively system of DC electrical drive pitch control)

应用李雅谱诺夫函数稳定性分析法来设计自适应系统的控制律, 可以保证系统的稳定性. 上述直流电动变桨控制系统传递函数模型可写成

$$G_p(s) = \frac{Y_p(s)}{U(s)} = \frac{K_p N_p(s)}{D_p(s)}. \quad (3)$$

其中: $G_p(s)$ 是严格真的, K_p 为增益参数, $D_p(s)$ 和 $N_p(s)$ 均是首一多项式. 由此, 设计参考模型为:

$$G_m(s) = \frac{Y_m(s)}{R(s)} = \frac{K_m N_m(s)}{D_m(s)}, \quad (4)$$

其中: K_m 为常数, $D_m(s)$ 和 $N_m(s)$ 均是首一多项式, 即 $G_m(s)$ 是最小相位系统.

由Hurwitz多项式引理可知, 若 $G_m(s)$ 不满足严格正实的条件, 就不能保证误差传递函数严格正实. 所以, 为保证其严格正实, 引入一个适当的多项式 $L(s) = s + a$, 从而使 $L(s)G_m(s)$ 严格正实. 另外, 再设计一个可调增益 $K_c(t)$ 和两个辅助信号发生器 F_1, F_2 , 共同构成如图2所示的自适应控制系统.

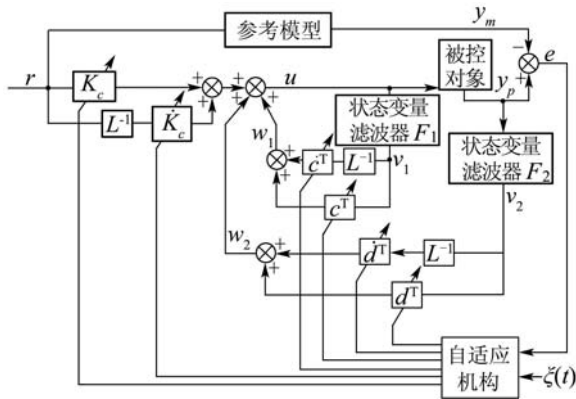


图2 自适应控制系统结构图

Fig. 2 Structure graph of adaptively control system

4 直流电动变桨自适应系统控制律设计(Adaptively system control rat design of DC electrical drive pitch)

为使可调系统和参考模型完全匹配, 则必须使

$$G_s(s) = G_m(s). \quad (5)$$

令可调系统的可调参数向量转置形式为

$$(K_c(t) \ c_f^T(t) \ d_f^T(t) \ d_0), \quad (6)$$

信号向量转置形式记为

$$(r(t) \ v_1^T(t) \ v_2^T(t) \ y_p(t)). \quad (7)$$

由图2可知, 加到被控对象的控制输入量 u 为

$$u(t) = [\theta(t) + \dot{\theta}(t)L^{-1}(s)]^T \phi(t). \quad (8)$$

如果将 $\theta(t)$ 表示为

$$\theta(t) = \theta_0 + \tilde{\theta}(t), \quad (9)$$

其中: θ_0 表示匹配值, $\tilde{\theta}(t)$ 表示失配值, 则

$$u(t) = [\theta_0 + \tilde{\theta}(t) + \dot{\theta}(t)L^{-1}(s)]^T \phi(t), \quad (10)$$

式中 $\tilde{\theta}(t)$ 由自适应律来决定. 要使可调系统和参考模型完全匹配, 则有下式

$$G(s) = G_m(s), \quad (11)$$

此时, 定义广义输出误差为

$$e(t) = y_p(t) - y_m(t), \quad (12)$$

因此可以得到如下增广状态误差方程:

$$\begin{cases} \dot{\xi}(t) = A\xi(t) + bL\tilde{\theta}^T(t)\xi(t), \\ e(t) = c^T\xi(t). \end{cases} \quad (13)$$

若以 $\tilde{\theta}^T(t)\xi(t)$ 为输入, 以 $e(t)$ 为输出, 考虑到匹配条件, 则与上式对应的传递函数为

$$G_e(s) = c^T(sI - A)^{-1}bL(s) = \frac{K_p}{K_m} G_m(s)L(s), \quad (14)$$

对上述系统, 采用自适应律

$$\tilde{\theta}(t) = -R_e(t)\xi(t). \quad (15)$$

5 仿真研究及结论(Simulation and conclusion)

对于系统模型

$$G_p(s) = \frac{Y_p(s)}{U(s)} = \frac{K_p N_p(s)}{D_p(s)}. \quad (16)$$

设计参考模型为

$$G_m(s) = \frac{Y_m(s)}{R(s)} = \frac{K_m N_m(s)}{D_m(s)}, \quad (17)$$

选用稳定多项式为 $L(s) = s + a$, 则由模型匹配条件, 两个辅助信号发生器的特征多项式应选为: $D_f(s) = L(s)N_m(s) = s + a$, 则

$$G_1(s) = \frac{N_c(s)}{D_f(s)} = \frac{c_1}{s + a}, \quad (18)$$

$$G_2(s) = d_0 + \frac{N_a(s)}{D_f(s)} = d_0 + \frac{d_1}{s + a}. \quad (19)$$

定义广义输出误差为

$$e(t) = y_m(t) - y_p(t), \quad (20)$$

则根据上述李雅谱诺夫设计方法, 可以得出如下的自适应控制律:

$$\begin{cases} \dot{K}_c(t) = g_1 e(t) \frac{1}{s+a} r(t), \\ \dot{c}_1(t) = g_2 e(t) \frac{1}{s+a} r_1(t), \\ \dot{d}_1(t) = g_3 e(t) \frac{1}{s+a} r_2(t), \\ \dot{d}_0(t) = g_4 e(t) \frac{1}{s+a} r_p(t). \end{cases} \quad (21)$$

式中 g_1, g_2, g_3, g_4 均为常数.

利用Simulink工具箱对所设计系统进行仿真, 当对象参数未变化时, 其中 $a = 5, g_1 = 80000, g_2 = g_3 = g_4 = 8000, K_c(0) = 0.5, c_1(0) = 0.1, d_0(0) = 0.01$, 当对象参数未变化时, 仿真结果如图3所示.

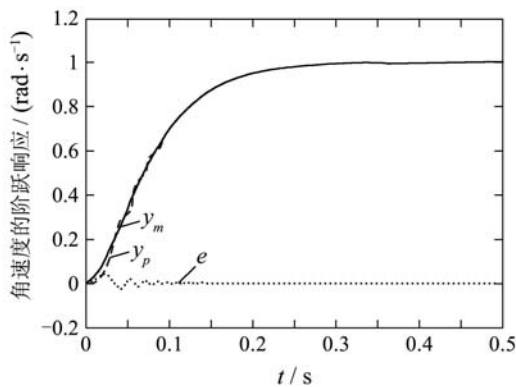


图3 对象参数未变化时的响应曲线

Fig. 3 Respond curve under constant permanent

当对象参数变为: $K_p = 200, a_{p1} = 52, a_{p0} =$

100时, 仿真结果如图4所示.

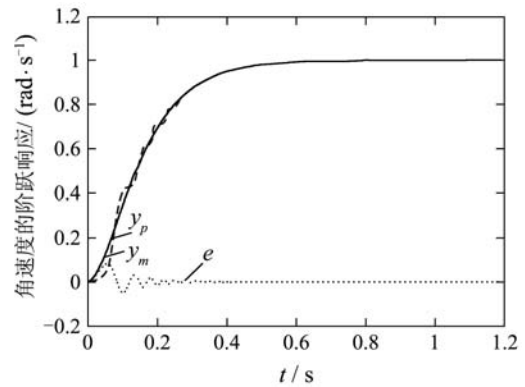


图4 对象参数变化后的响应曲线

Fig. 4 Respond curve under varied permanent

本文基于直流变桨距控制系统模型, 推导出了直流电动变桨距系统的传递函数, 设计出闭环系统输入输出模型参考自适应控制系统, 并且基于李雅谱诺夫稳定性理论给出系统控制律. 仿真结果表明, 不论参数变化与否, 采用模型参考自适应控制方法使得系统实际输出都能很好的跟踪模型的输出, 说明了自适应控制算法在直流电动变桨距系统控制中是有效的.

参考文献(References):

- [1] 陈宗基. 自适应技术的理论及应用—控制、滤波、预报[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 1991.
(CHEN Zongji. *Theory and Applications of Adaptive Technology-Control, Filtering, Prediction*[M]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics Press, 1991.)
- [2] 徐湘元. 自适应控制理论与应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2007.
(XU Xiangyuan. *Theory and Applications of Adaptive Control*[M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2007.)