

变转速风力机额定风速以上的非线性控制 ——恒功率输出控制问题

包能胜 姜 桐 陈庆新

(汕头大学能源与环境研究所·汕头, 515063)

摘要: 讨论了在额定风速以上时变转速风力机的控制问题, 系统采用基于微分几何理论下的桨距角和触发角双输入控制. 变转速风机是一个带有大范围风速的多输入多输出非线性系统, 通过坐标变换, 使非线性系统转化为一个标准的线性系统. 直接利用所推导的仿射非线性机理模型, 在额定风速以上, 采用微分几何精确线性化理论, 通过坐标转换, 实现变转速风机全局精确线性化控制, 给出了反馈控制算法, 并对闭环系统进行了数字仿真.

关键词: 变转速风机系统; 微分几何理论; 全局线性化

Nonlinear Control of a Variable Speed WT System on ARWS ——Power Limitation Problem

Bao Nengsheng, Jiang Tong and Chen Qingxin

(Institute of the Energy and Environmental Science, Shantou University · Shantou, 515063, P. R. China)

Abstract: This paper addresses the control problem of a variable speed wind turbine system in above rated wind speed which uses pitch angle control of the blades and delay angle control of the rectifier, with special emphasis on the differential geometric theory. Wind turbine system has typical nonlinear factor with stochastic disturbance. A nonlinear system can be described by a new linear system with the differential geometry coordinates transformations. In this paper, first, the nonlinear theoretical model of the variable speed WT system is built in. Then, the nonlinear model is linearized globally by differential geometry transmission and a new linear model is obtained. The nonlinear model can be described as a new linear system. Finally, a nonlinear controller is designed relying on the base of linear quadratic optimal algorithm of the new linear system.

Key words: variable speed wind turbine system; differential geometry theory; global linearization

1 引言(Introduction)

在文[6,7]中讨论了风力机基于某一工况点附近线性化模型的 LQG 控制器设计的问题, 在系统工况点附近小扰动范围内有较好的控制性能. 但风力机系统是一个大范围风速扰动的系统, 仅仅基于某一工况点附近线性化的模型所设计的控制器并不能满足系统大范围扰动下的控制性能. 为了能够得到整个系统的控制器, 他们采用的是在各个工况点得到不同的线性化模型, 然后分别设计控制器, 根据系统运行的工况, 查找对应的控制器反馈参数. 这样的控制器设计有很多的弊端, 在各个工况点之间进行切换容易给系统极大的冲击, 必须在技术上采取一定的措施^[5], 如能得到系统全局精确线性化模型的话, 这是最理想的情况.

近十年来, 非线性控制理论有了突破性的进展^[1~3], 微分几何在非线性控制系统中的成功应用提供了这个可能^[4,5]. 本论文直接利用所推导的仿射非线性机理模型, 在额定风速以上 (Above Rated

Wind Speed), 应用微分几何线性化理论, 实现变转速风机系统在额定工况以上全局线性化控制, 给出了反馈控制算法, 并对闭环系统进行了数学仿真.

2 机理模型(Theoretical model)

变转速系统可分为三个子系统: 气动设备部分、能量传递装置、同步发电机与整流逆变部分. 气动设备输入部分包括风速 V 、叶片桨距角 β 及转子转速 ω_r , 并产生一个输出: 转子转矩 T_r . 采用伺服机构可以调节叶片桨距角 β ; 能量传递装置包括风轮及其传动轴、齿轮箱等; 同步电机带整流桥 (rectifier)、DC-link 以及逆变器 (inverter) 并网运行. 我们利用一些假设, 推导出整个风力发电机的整体机理非线性模型^[6,7].

设系统仿射型非线性方程的表示如下:

$$\begin{cases} \dot{X}(t) = f(X) + g(X)u, \\ y_1(t) = h_1(X), \\ y_2(t) = h_2(X). \end{cases} \quad (1)$$

其中

$$f(X) =$$

$$\begin{bmatrix} -\frac{1}{T_\beta} \beta \\ -\frac{1}{T_\alpha} \alpha \\ \frac{K_r}{J_v} C_q - \frac{C_0}{J_v} - \frac{C_1}{J_v} \omega_r - \frac{K_e}{J_v} \omega_r^{0.876} \left(\frac{1 + \cos \alpha}{2} \right)^2 \end{bmatrix},$$

$$g(X) = \begin{bmatrix} \frac{1}{T_\beta} & 0 \\ 0 & \frac{1}{T_\alpha} \\ 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$X = [\beta \quad \alpha \quad \omega_r]^T, u = [\beta_r \quad \alpha_r]^T,$$

$$J_v = J_r + v^2 J_g.$$

其中, V 为风速, $T_\beta, T_\alpha, K_e, C_0, C_1$ 为对应的参数, β 为桨距角, α 为整流器触发角, $K_r = 0.5\rho\pi R^3 V^2$.

高风速下系统调节的目标在于使系统的输出功率保持恒定, 因此, 系统的输出方程可选择如下形式:

$$h_1(X) = K_v C_p(\beta, \omega_r) - P_{v0}, \quad (2)$$

$$h_2(X) = K_{e0} \omega_r^{1.876} - P_{e0}. \quad (3)$$

其中

$$K_v = 0.5\rho\pi R^2 V^3, K_{e0} = K_e \left(\frac{1 + \cos \alpha_0}{2} \right)^2 v,$$

P_{v0} 为额定工况下的桨叶输出功率, P_{e0} 为额定工况下电机输出功率, α_0 为额定工况下整流器触发角. 如果能通过调节桨距角和触发角, 使得上述输出函数值保持恒定的话, 则就满足了系统调节的要求.

3 非线性控制器设计(Nonlinear controller design)

定理 设两个输入两个输出仿射非线性系统(1), 若其关系度总数 $r = r_1 + r_2 = n$, n 为系统的阶数, 则通过选择一坐标映射 $Z = \Phi(X)$ 为:

$$z_1 = \varphi_1(X) = h_1(X),$$

$$z_{r_1+1} = \Psi_1(X) = h_2(X);$$

$$z_2 = \varphi_2(X) = L_f h_1(X),$$

$$z_{r_1+2} = \Psi_2(X) = L_f h_2(X);$$

$\vdots$

$$z_{r_1} = \varphi_{r_1}(X) = L_f^{r_1-1} h_1(X),$$

$$z_n = \Psi_{r_2}(X) = L_f^{r_2-1} h_2(X).$$

则系统可转换为以新坐标系 Z 表述的线性化标准形式:

$$\begin{cases} \dot{Z} = AZ + Bv, \\ y = CZ. \end{cases} \quad (4)$$

A, B, C 为标准矩阵.

根据上面的定理, 经过验证, 系统(1)符合全局线性化的条件.

则, 选择坐标转换 Z 为:

$$z_1 = K_v C_p(\beta, \omega_r) - P_{v0}, \quad (5)$$

$$z_2 = K_{e0} \omega_r^{1.876} - P_{e0}, \quad (6)$$

$$z_3 = K_{e0} 1.876 \omega_r^{0.876} f_3(X). \quad (7)$$

为了更好地满足系统调节的要求, 我们采取一种带积分器的控制器结构, 选择两个状态量, 满足以下要求:

$$z_4 = \int z_1 dt, \quad (8)$$

$$z_5 = \int z_2 dt. \quad (9)$$

如果能通过调节桨距角和触发角, 使得这两个状态量保持恒定, 则系统调节器更能满足其要求.

对于新系统, 我们可利用 LQR 控制算法, 选择加权矩阵 Q, R , 得到系统的反馈控制量 v^* .

$$v^* = -K_f Z \quad (10)$$

K_f 为反馈控制矩阵.

则非线性系统的反馈控制量 u^* 为

$$u^* = \text{inv}(\bar{A}(Z)) \cdot (v^* - \bar{B}(Z)). \quad (11)$$

inv 表示矩阵 $\bar{A}(Z)$ 的逆

$$\bar{A}(Z) = \begin{bmatrix} L_f h_1(X) \\ L_f^2 h_2(X) \end{bmatrix},$$

$$\bar{B}(Z) = \begin{bmatrix} L_{g_1} h_1(X) & L_{g_2} h_1(X) \\ L_{g_1} L_f h_2(X) & L_{g_2} L_f h_2(X) \end{bmatrix}.$$

4 结果与讨论(Results and discussion)

从系统的反馈控制能看到, 反馈输出是系统状态量的非线性函数, 而且计算比较复杂, 需测量的量包括风轮转速、桨距角、触发角等, 式中有几个重要的参量: 风轮功率系数和扭矩系数对桨距角的偏导数、风轮功率系数和扭矩系数对转速的偏导数, 这几个量都与系统桨叶的特性有关, 对于一台具体的风力机来说, 前两个参数能从桨叶的气动设计中得到, 并且要求较为精确的数值.

图 1 为风速从 12m/s 阶跃到 16m/s 时的响应曲线, 从图中能够看到转速由于风速的上升而上升, 控制器的输出强迫桨距角同样增大, 使得风轮转速限定在一定的范围内, 当风速阶跃 4m/s 时, 功率的最大飞升超调为 30%, 调节时间约为 0.5 秒.

图 2 用的是实际现场的风速在闭环控制下的响应曲线. 机组在刚开始时, 由于风速是突然从平衡点

的 12m/s 变化到 15.5m/s 左右,但桨距角要从平衡点的值相对较慢增大,并且由于执行机构的时间常数与机组的迟延,使得机组的输出功率迅速上升到较高的值,当执行机构动作,则功率都快速下降,使得机组马上回到设定的平衡点附近运行,从仿真曲线上看,控制器能够满足机组在大风速范围内的调节要求。

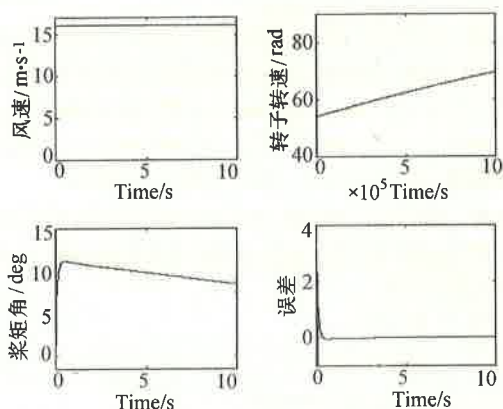


图 1 闭环系统阶跃仿真曲线

Fig. 1 Close-Circle response of the wind speed jump 12m/s to 16m/s

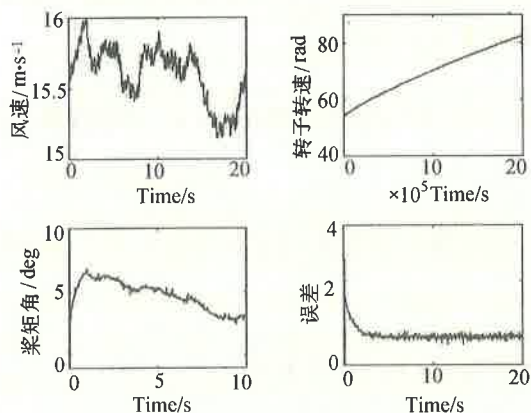


图 2 闭环系统实际风速扰动仿真曲线

Fig. 2 Closed-circle simulation curve at wind speed input

讨论 对于基于微分几何非线性控制理论设计的控制器,由于其控制理论的局限,从整体上和针对风力机这样一个特殊的调节对象,其主要问题有以下几个方面:

1) 反馈控制算法非常复杂,对比线性系统 LQG 或其它的控制算法,基于微分几何非线性控制理论的反馈控制算法要复杂得多,一般反馈输出都是状态向量的复杂非线性函数,而 LQG 等控制算法都是较为简单的线性运算,因此,非线性控制算法对控制 CPU 的性能要求较高。

2) 对于风力机特殊的系统来说,由于风的随机性以及气动性能的随机性和相应的假设,使得基于

物理概念建立的机理模型有许多不确定性因素,因此机理模型不能完全反映系统的动态特性,即模型动态与系统实际动态有一定的差别,在这种情况下,基于机理模型而设计的非线性控制器能否对这种不确定性因素有较强的鲁棒性?

回答这个问题现在有一定的困难,由于微分几何控制理论只是在近几年发展起来的一种新的非线性系统控制算法,对于模型不确定性问题还有待更深入地讨论,对风力机这样实际的系统,下一步的工作将主要讨论这个问题,即风力机系统的结构不确定性问题。

3) 从非线性反馈控制算法中能看到,输入反馈对线性化之后的新线性系统是二次最优的(采用 LQR 控制算法),但有一个问题,这样的反馈控制算法对原来的非线性系统是否也是最优的呢?

文[8]对上述问题有特别的讨论,其结论是:给定非线性反馈算法(11),在准二次性能函数(quasi-quadratic performance index)下是最优的,准二次性能函数定义为:

$$J(Z) = \frac{1}{2} \int_0^{\infty} (Z^T Q Z + \dot{Z}^T R \dot{Z}) dt.$$

具体的证明可参阅文[8]。

4) 从反馈控制算法中能看到,有效的来流风速对系统的控制器输出有很大的关系,这里的有效风速是指空间和时间上的有效性,由于风力机运行的实际环境差别特别大,而且风速随地点、时间、季节以及天气等许多因素在变化,对于同样设计的机组,在不同的时间、季节、地点以及天气情况,其风能利用曲线都有所不同,因此建立一个针对某一运行风力田的有效平均风速估计模型显得非常重要。

这是一个特殊的问题,建立有效平均风速模型只有在同力机实际运动环境下才有效,比较难以用一个通用的模型来描述,现在已经建立起其估计模型,但与实际输入的风速还是有差别,这种差别可在模型的不确定性来考虑,而对于风能利用系数曲线的改变,可以从理论上加以修正,最好的方法是定时辨识出它们的曲线,然后加以修正。

5 结论(Conclusion)

本论文采用微分几何控制理论对水平轴变转速风力机在额定风速以上进行了全局线性化和非线性控制器的设计,从闭环仿真的结果可以看出,基于微分几何非线性控制理论的控制器对大范围的风速输入有较好的响应性能,能够满足系统的控制目标,但相应的由于理论和实际的缘故,非线性控制器在实

际中能否达到较好的效果还有待实际系统的设计性能检验。

参考文献(References)

- 1 Alberto Isidori. Nonlinear Control Systems. 2nd ed. Beijing: World Publishing Corporation, 1991
- 2 卢强, 孙元章. 电力系统非线性控制. 北京: 科学出版社, 1993
- 3 程代展. 非线性系统的几何理论. 北京: 科学出版社, 1988
- 4 黄曙碧, 程代展. 微分几何方法及其在化学反应器控制中的应用. 自动化学报, 1988, 14(5): 329 - 336
- 5 卢强, 孙元章, 高景德. 非线性系统几何结构理论的发展及其在电力系统中的应用. 中国电机工程学报电工数学特刊, 1990, 10(增刊): 15 - 21
- 6 Steinbuch. Dynamic Modeling and Robust Control of a Wind Energy Conversion System: [Ph.D Thesis]. Beijing: Tsinghua University, 1990

- 7 Bao Nengsheng, Jiang Tong, Chen Qinxing. Modeling and identification of the wind turbine system. Wind Engineering, 1996, 20(4): 203 - 218
- 8 Lu Q, Sun Y, Xu Z, Mochizuki T. Decentralized nonlinear optimal excitation control. IEEE Trans. on Power Systems, 1996, 11(4): 1957 - 1962

本文作者简介

包能胜 1971 年生. 助教. 1994 年从清华大学热能工程系毕业, 获学士学位; 1997 年从汕头大学毕业, 获清华大学工程硕士学位. 现主要的兴趣在于风力机的系统监控.

姜 桐 1937 年生. 教授. 1954 年到 1959 年在上海交通大学动力机械系学习, 1959 年到 1980 年在西安交通大学工作, 并担任透平实验室主任和系主任. 1982 年到 1985 年在美国做访问学者, 1989 年至 1998 任汕头大学常务副校长. 主要从事透平测量, 动力系统控制等方面的研究.

陈庆新 1963 年生. 副教授. 1988 年获得西安交通大学工程学士学位, 1992 年获得工程博士学位. 主要的研究领域是随机控制, 物业质量和流程控制等.

2000 年中国过程控制年会征文通知

2000 年中国过程控制年会将于 2000 年 8 月 5 日至 9 日在呼和浩特市举行, 本次会议由中国自动化学会过程控制专业委员会主办, 清华大学自动化系和内蒙古工业大学电力学院承办.

征文范围

1) 过程建模、仿真与辨识; 2) 过程控制的新理论、新方法、新技术与新的应用成果; 3) 过程检测、故障诊断与容错控制; 4) DCS、CIPS 和 FB 控制系统等.

论文要求

全文控制在 A4 打印纸 5 页以内, 按《自动化学报》格式, 小四号宋体字排版. 来稿应没有在其它刊物和会议上发表过.

论文发表

所录用的论文将于会前分别以《自动化学报》和《清华大学学报》增刊的形式发表.

截稿日期

论文截稿时间为 2000 年 2 月 20 日.

投稿地址

北京清华大学自动化系

联系人: 周东华教授

邮 编: 100084

中国自动化学会过程控制专业委员会
清华大学自动化系
内蒙古工业大学电力学院