

基于LPV增益调度技术的风机主动容错控制

吴定会^{1†}, 李意扬¹

(1. 江南大学 物联网工程学院, 江苏 无锡 214000)

摘要: 针对风能转换系统具有非线性和参数的不确定性, 提出了基于LPV增益调度的风能转换系统的主动容错控制方法, 解决故障对风力机组带来的不稳定性问题。基于LPV凸分解方法, 将风能转化系统非线性模型化为具有凸多面体结构LPV模型, 利用LMI技术对凸多面体各个顶点分别设计 H_∞ 控制器, 再利用各顶点设计的反馈控制器得到具有凸多面体结构LPV容错控制器。仿真结果表明, LPV增益调度技术可以成功地应用于风能转换系统的容错控制。

关键词: 风能转换系统; 主动容错控制; LPV增益调度技术; 凸分解

中图分类号: TK81 **文献标识码:** A

Active Fault-Tolerant LPV Control of Wind Turbines

WU Ding-hui^{1†}, LI Yi-yang¹

(1. School of Internet of Things, Jiangnan University,
Wuxi Jiangsu 214112, China)

Abstract: According to the pitch actuator fault of WECS (Wind Energy Conversion System) has nonlinear properties and uncertain parameters, an active fault tolerant control technology of WECS was proposed to resolve the dynamic stability problems of the wind turbines, which based on the LPV gain scheduling technology. The linearized model around the operating point of wind turbine and fault were converted into convex polyhedron structure LPV model by using LPV convex decomposition method. Then each vertex of convex polyhedron was designed to meet the H_∞ performance by using LMIs (linear matrix inequalities). All the vertex gain were synthesized to get LPV controller with convex polyhedron structure. The simulation result shows that the LPV active fault tolerant controller could be applied to the WECS successfully.

Key words: WECS; active fault tolerant control; LPV gain scheduling technology; convex decomposition

1 引言(Introduction)

最近20年, 风机的总装机量增长迅速, 从1992年的2.5GW到2010年的200GW [?]. 随着对风机效率和可靠性要求的提高, 现代风机不再如传统风机那样一味追求高的产能, 而是将更多的考虑成本问题, 如可靠性, 运维成本, 风机的使用寿命等等。由于大多数风机安装在远离人烟的地区, 将容错控制技术引入风力发电系统可以大幅减少维护的成本。容错控制是在保证当控制系统中的某些部件发生故障时, 还能安全地完成控制任务的一种控制技术。容错控制包括被动容错和主动容错, 其中被动容错控制 [?] 是考虑正常工作和故障状态的参数值设计适当固定结构的控制器, 在故障前后使用同样的控制器。主动容错 [?] 则是在故障发生后重新调整控制器参数, 或者改变控制器结构, 与被动容错最大的不同在于依赖故障诊断机构。

从控制的角度看, 风速的变化和故障的发生导

致了风力机的动态特性在工作点附近发生非线性变化, 又由于缺少风力机精确的数学模型, 传统的控制器设计策略难以着手 [?, ?]。//无论是传统的鲁棒技术 [?] 还是一般的增益调度控制 [?], 对对象参数的变化和工作点的选取, 要求都非常苛刻, 不符合实际情况。//基于鲁棒控制的线性参数变化(Linear Parameter Varying, LPV) 增益调度技术对这种动态特性变化显著的风力系统会非常有效 [?, ?]。对海上风力系统来讲, 鲁棒性和容错性都是必不可少的主要特性, 而LPV控制方法恰恰能够同时处理由风速、故障带来的参数变化和模型本身描述不精确的问题。

LPV容错控制器采用当前工作点附近的风速估计值和故障诊断机构输出的故障信息作为增益调度变量, 将模型转换为仿射依赖型, 在线性矩阵不等式(Linear Matrix Inequalities LMIs)约束下求出最优控制器。

在一个实际的系统中, 传感器, 执行器和系统构件中均可能发生故障, 从缓慢变化的到急性的。这些故障所表现出的共性就是系统动态特性的变化, 从而使它们大部分都可被描述成一个线性变化的参数。本文中, 为了突出控制器的设计过程, 选取了一种常见的单一故障, 即桨距执行器的液压系统故障。当液油中混入过多空气, 桨距执行器的动态特性就会变差, 从而影响在额定风速之上时, 风机的恒功率控制[7]。在实际运行和仿真中, 虽然LPV的综合过程中LMI迭代求解计算量大, 但LPV容错控制器是离线计算, 在线运行时只需在每个采样周期, 根据故障信息的变化, 经过简单的算数运算, 便可得出随增益调度变量变化的控制器, 涉及的运算量很小。还有一个问题, 在实际系统中, 在有限的采样周期内获得故障信息的精确估计是不太可能的, 值的庆幸的是Apkarian等人[8]已经证实LPV对时变参数的估计误差并不敏感, 不需精确估计就可将LPV控制应用于系统的容错控制。

本文组织如下: 第2章描述了风力机和故障数学模型, 并推导出了其对应的LPV仿射依赖模型。在第3章将无限维的控制器转换为顶点的凸优化问题, 并给出了计算的步骤。第4章和第5章中, 给出无容错和有容错控制器的对比仿真图, 并对仿真结果进行分析, 最后给出了结论。

2 风力机模型(Wind Turbine Model)

在仿真中, 使用了风力机的非线性模型, 其中包括空气动力学子模型, 传动机构子模型, 桨距执行器子模型和故障模型[9]。

2.1 空气动力学模型(Aerodynamic Model)

风力机的叶桨将风能转换到转子侧, 以速度 $\omega_r(t)$ 旋转。风的动能依赖于风速 $v_r(t)$, 空气密度 ρ 和叶桨的等效面积 A 。风能转换到转子侧的能量的效率为 $C_p(\lambda(t), \beta(t))$, 这是桨距角 $\beta(t)$ 和叶尖速比 $\lambda(t)$ 的函数。气动转矩可由下式给出:

$$T_a(t) = \frac{1}{2\omega_r(t)} \rho A v_r^3(t) C_p(\lambda(t), \beta(t)) \quad (1)$$

2.2 传动机构模型(Drive Train Model)

传动机构是低速侧和高速侧组成。低速和高速侧转动惯量分别为 J_r 和 J_g , 摩擦系数分别为 B_r 和 B_g , 高低两侧的齿轮比为 N_g 。为更好的模拟真实传动机构, 考虑粘性摩擦, 扭力衰减系数是 B_{dt} , 扭转刚度是 K_{dt} 。传动系统的输出是扭矩角 $\theta_\delta(t)$, 电机产生的转矩 $T_g(t)$ 和发电机转速 $\omega_g(t)$ 。模型如下:

$$J_r \dot{\omega}_r(t) = T_a(t) + \frac{B_{dt}}{N_g} \omega_g(t) - K_{dt} \theta_\Delta(t)$$

$$-(B_{dt} + B_r) \omega_r(t) \quad (2)$$

$$J_g \dot{\omega}_g(t) = \frac{K_{dt}}{N_g} \theta_\Delta(t) + \frac{B_{dt}}{N_g} \omega_r(t) - T_g(t) - \left(\frac{B_{dt}}{N_g^2} + B_g \right) \omega_g(t) \quad (3)$$

$$\dot{\theta}_\Delta(t) = \omega_r(t) - \frac{1}{N_g} \omega_g(t) \quad (4)$$

2.3 包含故障信息的桨距执行器模型(Pitch System Model Including Fault Model)

桨距执行器模型如下:

$$\ddot{\beta}(t) = -2\zeta\omega_n\dot{\beta}(t) - \omega_n^2\beta(t) + \omega_n^2\beta_{ref}(t - t_d) \quad (5)$$

其中 t_d 是变桨距执行器的时间常数, $\beta_{ref}(t)$ 是桨距角的参考值, ω_n 是变桨距执行器模型的自然振荡频率。 ζ 是变桨距执行器模型的阻尼系数。

桨距执行器中液压油空气含量过高的故障, 其变化主要影响的是阻尼系数 ζ 、自然振荡频率 ω_n 。 α_{ha} 为故障影响因子。其故障模型为:

$$\bar{\zeta}(t) = (1 - \alpha_{ha}(t))\zeta_{min} + \alpha_{ha}(t)\zeta_{max} \quad (6)$$

$$\bar{\omega}_n(t) = (1 - \alpha_{ha}(t))\omega_{n,min} + \alpha_{ha}(t)\omega_{n,max} \quad (7)$$

当故障影响因子 $\alpha_{ha} = 0$ 变成 $\alpha_{ha} = 1$, 其对应的空气密度就从7%变化为15%。

2.4 风力机LPV模型(LPVP Model of Wind Turbine)

空气动力学模型中的 $C_p(\lambda(t), \beta(t))$ 是风力机呈现非线性的动态特性的主因。使用一阶泰勒公式对气动转矩展开, 得:

$$T_a \approx \bar{T}_a(\bar{v}_r, \bar{\omega}_r, \bar{\beta}) + \frac{\partial T_a}{\partial \beta} \hat{\beta} + \frac{\partial T_a}{\partial v_r} \hat{v}_r + \frac{\partial T_a}{\partial \omega_r} \hat{\omega}_r \quad (8)$$

其中

$$\begin{cases} \frac{\partial T_a}{\partial v_r} = \frac{\rho A v_r^2}{2\omega_r} (3C_p + v_r \frac{\partial C_p}{\partial \lambda} \frac{\partial \lambda}{\partial v_r}) \\ \frac{\partial T_a}{\partial \omega_r} = \frac{\rho A v_r^3}{2\omega_r} \left(\frac{\partial C_p}{\partial \lambda} \frac{\partial \lambda}{\partial \omega_r} - \frac{C_p}{\omega_r} \right) \\ \frac{\partial T_a}{\partial \beta} = \frac{\rho A v_r^3}{2\omega_r} \frac{\partial C_p}{\partial \beta} \end{cases} \quad (9)$$

展开后的泰勒表达式的分量均为近似为风速 v_r 的线性函数, 这意味着可将风速作为LPV模型的增益调度变量:

$$\theta_{op}(t) := v_r(t) \quad (10)$$

同时将故障影响因子作为另一个增益调度变量:

$$\theta_f(t) := \alpha_{ha} \quad (11)$$

选取系统状态变量, 控制量分别为: $x(t) = [\beta(t), \dot{\beta}(t), \theta_\Delta(t), \omega_g(t), \omega_r(t)]^T$, $u(t) = \beta_{ref}(t)$ 。

便可得出变桨距风力机系统的LPV模型:

$$\dot{x}(t) = A(\theta_{op}, \theta_f)x(t) + B_1(\theta_{op}, \theta_f)w(t) + B_2(\theta_{op}, \theta_f)u(t) \quad (12)$$

其中

$$A(\theta_{op}, \theta_f) = \begin{bmatrix} 0 & \omega_n^2(t) & 0 \\ -1 & -2\zeta\omega_n^2(t) & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{K_{dt}}{J_g N_g} \\ \frac{1}{J_r} \frac{\partial T_a(\theta_{op}(t))}{\partial \beta} & 0 & -\frac{K_{dt}}{J_r} \\ 0 & 0 & 0 \\ -\frac{1}{N_g} & 0 & 1 \\ -(\frac{B_{dt}}{J_g N_g^2} + \frac{B_g}{J_g}) & \frac{B_{dt}}{N_g J_g} & 0 \\ \frac{B_{dt}}{N_g J_r} & -\frac{B_{dt} + B_r}{J_r} + \frac{1}{J_r} \frac{\partial T_a(\theta_{op}(t))}{\partial \omega_r} & 0 \end{bmatrix} \quad (13)$$

3 应用环境(Environment)

4 公式的例子(Examples of equations)

4.1 公式的应用环境(Environment of equations)

公式请用环境

`\begin{eqnarray}...\end{eqnarray}`

或者

`\begin{eqnarray*}...\end{eqnarray*}`

生成.

4.2 几个实例(Examples)

例 1

$$\|x_{k+1}^{(1)} - x_k^{(1)}\|_\lambda \leq \frac{1}{1 - h_1(i)} \|x_{k+1}^{(1)}(0) - x_k^{(1)}(0)\| + \frac{h_2(i)}{1 - h_1(i)} \|e_k^{(1)}\|_\lambda + \rho(Q), \quad (14)$$

以及

$$\begin{cases} \dot{x}(t) \sum_{i=0}^{2n_x} = A^c x(t) + B^c u(t) + E^c d(t), \\ z(t) = C^c x(t). \end{cases} \quad t \in \mathbb{R}^+ \quad (15)$$

例 2 几种不同的情况.

1) 省略了矩阵中部分元素的例子.

$$\begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{nn} \end{pmatrix} \quad (16)$$

2) 矩阵中小数点对齐的例子.

$$A_1 = \begin{bmatrix} 1 & -2 \\ -2 & 4 \end{bmatrix}, \quad (17)$$

$$A_2 = \begin{bmatrix} 1.1 & -2.7 \\ -2.3 & 4.6 \end{bmatrix}. \quad (18)$$

3) 调整公式字体大小的特例.

用命令`\displaystyle`可以调整在文字中过小的公

式. $f(z) \approx \frac{1 + \frac{1}{2}z + z^2 + \frac{1}{2}z^3}{1 - \frac{1}{2}z + z^2}$. 类似前面这样的例子.

用命令`\textstyle`可以调整公式中过大的情况. 如下:

$$z^T(t) \{A_q^T [P(t) + I] A_q - [P(t) + I]\} z(t) + \sum_{i=1}^m \int_{t-\tau_i}^t z^T(s) \{A_q^T A_q - I\} z(s) ds \leq 0. \quad (19)$$

4) 公式的编号问题.

有些地方对于公式的编号需要子公式编号, 也就是说, 当这个环境之前的公式编号是(6)时, 那么此环境中的公式按照(7a), (7b), (7c), ... 的顺序编号.

$$\dot{x}(t) = A_i x_t(0) + A_{i1} x_t(-r), t \geq t_0. \quad (20a)$$

在第1个子公式和第2个子公式之间可以添加文字内容.

$$s := \{(t_0, \pi(0)), \dots (t_k, \pi(k)), \dots | t_i < t_j, i < j; \lim_{k \rightarrow \infty} t_k = \infty\}. \quad (20b)$$

在第2个子公式和第3个子公式之间同样可以添加文字内容.

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = A_i x_t(0) + A_{i1} x_t(-r), \\ y(t) = C_i x_t(0); t \geq t_0, i \in \{1, 2\}, \end{cases} \quad (20c)$$

5 插图(Figures)

Latex对于图形的要求: 对于一般的图形, 只需要用软件Acrobat Reader打开, 然后另存为.eps即可, 再利用下面的环境插入图形即可. 图形的位置由命令中“trim=0 0 0 0”来控制, 可以通过修正其中的4个参数来移动图形的位置. 所给出的4个数字分别表示从图形的左边缘、下边缘、右边缘、上边缘被截去的值, 正数表示从边缘截去的大小, 而负数表示从边缘加上的大小.

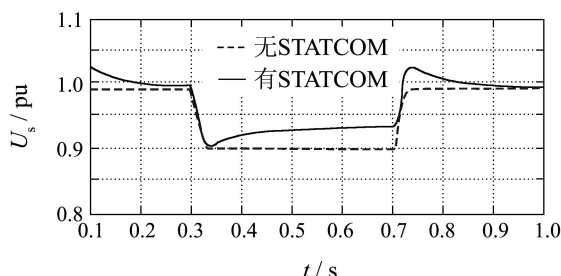


图 1 图形标题

Fig. 1 Title of figure

6 表格(Tables)

表 1 模糊控制规则

Table 1 Fuzzy control rules

e	Δe						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NM	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NS	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NO	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
PO	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB

参考文献(References):

- [1] ARIMOTO S, KAWAMURA S, MIYAZAKI F. Bettering operation of robotics by learning[J]. *Journal of Robotic System*, 1984, 12(2): 123 – 140.
- [2] YAO Zhongshu, WANG Hongfei, YANG Chengwu. A sort of iterative learning control algorithm for tracking of robot trajectory[J]. *ACTA ArmamentarII*, 2004, 25(3): 330 – 334.
(姚仲舒, 王宏飞, 杨成梧. 一种机器人轨迹跟踪的迭代学习控制方法[J]. 兵工学报, 2004, 25(3): 330 – 334.)

- [3] DOGRUEL M, OZGUNZER U. Stability of hybrid systems[C] // *Proceedings of IEEE International Symposium on Intelligent Control*. New York: IEEE, 1994, 8: 129 – 134.
- [4] LI B. *The main algorithm research on financial time series data mining*[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2001.
- [5] WANG R X. *Random Process*[M]. Xi'an : Xi'an Jiaotong University Press, 1993.
- [6] HAYKIN S, BROCKETT R W. Adaptive filtering theory[M] // *Essays in Control*. New York, American: Prentice Hall, 1996.

附录 附录标题(Appendix Title of appendix)

附录内容.

作者简介:

张 三 (1961—), 男, 作者简历, 目前研究方向, E-mail: zhangsan@sina.com.cn;

李某某 (1958—), 女, 作者简历, 目前研究方向, E-mail: lim-m@sina.com.cn.