文章编号:1000-8152(2008)02-0321-04

额定风速以上风力发电机组的恒功率 H_{∞} 鲁棒控制

张先勇^{1,2}, 吴 捷³, 杨金明³, 舒 杰^{1,2}

(1. 中国科学院广州能源研究所,广东广州 510640;

2. 中国科学院可再生能源与天然气水合物重点实验室, 广东 广州 510640;

3. 华南理工大学 电力学院, 广东 广州 510640)

摘要:风力发电机组由于机械结构以及电气负荷承受能力的限制存在着转速限制和功率限制,额定风速以上时, 需要通过控制桨距角来实现额定恒功率输出,同时保持转速在额定转速处.本文建立了风力发电机组的详细机理 模型,将H_∞控制理论应用到额定风速以上时风力发电机组的恒功率输出的控制器设计,建立了标准H_∞恒功率控 制问题.利用LMI方法求解,得到了桨距角的H_∞控制器.仿真结果表明该H_∞控制器能够成功实现额定风速以上时 的恒功率输出控制,并且具有良好的鲁棒性.

关键词:风力发电机组;鲁棒控制;恒功率输出;LMI;桨距角 中图分类号:TM315 文献标识码:A

H-infinity robust control of constant power output for the wind energy conversion system above rated wind

ZHANG Xian-yong^{1,2}, WU Jie³, YANG Jin-ming³, SHU Jie^{1,2}

(1. Guangzhou Institute of Energy conversion, the Chinese Academy of Sciences, Guangzhou Guangdong 510640, China;

2. Key Laboratory of Renewable Energy and Gas Hydrate, CAS, Guangzhou Guangdong 510640, China;

3. College of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou Guangdong 510640, China)

Abstract: There exist limits in speed and power because of the mechanical load limit of the mechanical structure and the electric load limit of the electric components. When the wind speed is above the rated value, pitch angle is regulated to maintain the constant power output and the constant rotor speed. After the complete nonlinear mathematical model for the wind energy conversion system is established, H-infinity robust control theory is applied to realize the rated power output above the rated wind. The rated power output problem is transformed to a standard H-infinity problem. The LMI method is used to design the desired pitch controller. Simulation results show that rated power output is maintained by the controller above the rated wind. The controller is robust even there exists an uncertainty.

Key words: wind energy conversion system; robust control; constant power output; LMI; pitch angle

1 引言(Introduction)

在低风速时,风力发电机组的主要控制目标是如 何将随机变化的风能最大限度地转换为电能,即最 大风能捕获控制,这方面的研究在国内外已经广泛 开展并取得了较多成果^[1~3].而中高风速下风力发 电机组的控制目标为保持系统恒功率输出,对于中 高风速下的桨距角控制问题,国内外的研究尚不多 见且远未完善^[4~6].因此对于中高风速下的风力机 桨距角控制方法,有必要开展进一步的深入研究.

传统的控制理论如经典控制理论、现代控制理 论等都要求控制对象的精确模型或要求对象模型的 不确定性和外界干扰满足特殊的假定.但由于风力 发电机组的运行环境比较恶劣,风力发电机组的特性会随着时间发生变化,从而偏离设计时所依据的标称特性.近几十年发展起来的H_∞鲁棒控制理论是一个比较成功且比较完善的理论体系.它在设计过程中考虑了数学模型所具有的不确定性,设计的控制器能够使得系统对不确定性误差范围内的所有被控对象均能满足性能指标要求^[7].

本文对风力发电机组进行了详细的建模,在详细 分析机组恒功率输出特性及要求的基础上,将H_∞控 制理论应用到额定风速以上时风力发电机组的恒 功率输出的控制器设计,建立了恒功率控制的标 准H_∞控制问题,利用LMI方法求解,得到了桨距角

收稿日期: 2007-09-11; 收修改稿日期: 2007-12-17.

基金项目:中国科学院广州能源研究所所长创新基金资助项目;国家自然科学基金重点资助项目(60534040).

的H_∞控制器并进行了仿真研究, 仿真结果验证了该 控制算法的有效性.

2 H_∞鲁棒控制理论简介(H_∞ robust theory introduction)

标准H_∞控制问题如图1所示.图中w,u,z和y均为向量值符号.w为外部输入信号(包括给定信号、扰动和噪声等),u为控制输入信号,z为控制输出信号,y为测量输出信号.由输入信号w,u到输出信号z,y的传递函数阵G(s)所表示的对象称为增广被控对象,它包括实际被控对象和为了描述指标而设定的加权函数等,K(s)为控制器^[8].



图 1 标准 H_{∞} 设计问题 Fig. 1 Standard H_{∞} design problem

定义1 一个以复变函数为元的矩阵G(s)在右半复平面上的最大奇异值的上确界(如果存在)称为这个矩阵的 H_{∞} 范数,记作

$$\|G(s)\|_{\infty} = \sup_{\omega>0} \bar{\sigma}(G(j\omega)). \tag{1}$$

其中σ[·]表示矩阵的最大奇异值.

 H_{∞} 控制问题的目的就是要设计一个控制器K(s),使得如图1所示的闭环系统内部稳定,并使从w到z的传递函数 $T_{zw}(s)$ 的 H_{∞} 范数最小.

3 风力发电机组的建模(Modelling of the wind energy conversion system)

由于电磁时间常数远远小于机械时间常数,在该 文的研究中,忽略发电机的电磁响应的动态过程.变 速变桨距风力机经过传动机构带动发电机并网运行 的风力发电机组的结构框图如图2所示^[9].







3.1 风力机(Wind turbine)

$$J_r \frac{\mathrm{d}\omega_r}{\mathrm{d}t} = T_a - T_{ls} - K_r \omega_r. \tag{2}$$

其中: *J*_r为风力机的转动惯量与主传动轴的转动惯量之和; ω_r为风力机转动角速度; *T*_{ls}为主传动轴传递给刚性齿轮的扭矩; *K*_r为阻尼系数; *T*_a为风力机

所吸收的动力矩,是整个机组的驱动力矩,且T_a的大小可表示为

$$T_a = \frac{P_m}{\omega_r} = C_p(\lambda,\beta) \frac{1}{2} \rho \pi R^2 \frac{v^3}{\omega_r}.$$
 (3)

其中: P_m 为风力机所吸收的功率; λ 为叶尖速比, 且 $\lambda = \omega_r / v$; β 为叶片的桨距角; ρ 为空气密度; R为 风力机半径; v为风速. $C_p(\lambda, \beta)$ 为风力机的功率系 数, 在本文中采用式(4)的特性曲线.

$$C_p = 0.73(\frac{151}{\lambda_i} - 0.58\beta - 0.002\beta^{2.14} - 13.2)e^{\frac{-18.4}{\lambda_i}}.$$
(4)

3.2 传动系统(Drive chain)

传动系统的结构如图3所示. 假定次传动轴及增 速齿轮对均为绝对刚性的, 所有的柔性均集中在主 传动轴上, 主传动轴的柔性用虚线框中简化的弹簧 与阻尼器的并联结构来表示. 则主动轴的扭矩可表 示为

$$T_{ls} = K_{ls}(\theta_r - \theta_{ls}) + B_{ls}(\omega_r - \omega_{ls}).$$
 (5)

其中: θ_r 为风力机的角位移, θ_{ls} 为低速齿轮的角位移, K_{ls} 为主传动轴的弹性系数, B_{ls} 为主传动轴的阻尼系数.



增速齿轮对为完全刚性的,其变比可表示为

γ

$$n_g = T_{ls}/T_{hs} = \omega_g/\omega_{ls}.$$
 (6)

其中: $\omega_g = \omega_{ls}$ 分别为次传动轴与主传动轴的转速; T_{ls} 和 T_{hs} 分别为主传动轴和次传动轴的扭矩.

3.3 次传动轴与发电机(Secondary axis and generator)

由于次传动轴为刚性轴,其动态可表示

$$J_g \dot{\omega}_g = T_{hs} - K_g \omega_g - T_{em}.$$
 (7)

其中: *J_g*为发电机的转动惯量与次传动轴的转动惯量之和; *K_g*为发电机系统的阻尼系数; *T_{em}*为发电机的反扭矩.

以上诸方程一起构成了风力发电机组的非线性

$$\begin{cases} \dot{\omega}_{r} = -\frac{B_{ls} + K_{r}}{J_{r}} \omega_{r} + \frac{B_{ls}}{J_{r} n_{g}} \omega_{g} - \frac{K_{ls}}{J_{r}} \theta + \frac{1}{J_{r}} T_{a}, \\ \dot{\omega}_{g} = \\ \frac{B_{ls}}{J_{g} n_{g}} \omega_{r} + \left(\frac{K_{g}}{J_{g}} - \frac{B_{ls}}{J_{g} n_{g}^{2}}\right) \omega_{g} + \frac{K_{ls} \theta}{J_{g} n_{g}} - \frac{1}{J_{g}} T_{em}, \quad (8) \\ \dot{\beta} = -\frac{1}{T_{\beta}} \beta + \frac{1}{T_{\beta}} \beta_{r}, \\ \dot{\theta} = \omega_{r} - \frac{\omega_{g}}{n_{g}}. \end{cases}$$

根据风力发电机组的运行特性,额定风速以上时的恒功率控制也就是要求稳态运行时风电机组的转速和电磁转矩均维持在额定值.因此我们可以设定电磁转矩为额定值不变,通过调节桨距角来实现发电机的转速调节,从而实现恒功率输出,这样恒功率控制也就转化为恒转速控制问题.因此,式(8)的双变量系统就可简化为单变量控制系统.本文采用的无刷双馈风力发电机组的额定功率为20kW,电机的额定转速为835 r/min.经过局部线性化,得到系统在风速为13 m/s时的平衡点处的线性定常模型为

$$\begin{pmatrix} \dot{\omega}_r \\ \dot{\omega}_g \\ \dot{\beta} \\ \dot{\theta} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -137.43 \ 22.3214 \ -70.0741 \ -1000 \\ 22.3214 \ -4.97 \ 0 \ 223.2143 \\ 0 \ 0 \ -5 \ 0 \\ 1 \ -0.2232 \ 0 \ 0 \end{pmatrix} \cdot \\ \begin{pmatrix} \omega_r \\ \omega_g \\ \beta \\ \theta \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 5 \\ 0 \end{pmatrix} u + \begin{pmatrix} 214.115 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} w.$$
(9)

其中: $u = \beta_r$, w = v. 输出变量为发电机的转速 $y = \omega_g$, 根据状态方程, 可求得输入到输出的传递函数矩阵为

$$\omega_g = P_2 u + P_1 w. \tag{10}$$

其中:

$$\begin{split} P_1 &= \frac{4780s^2 + 71690s + 238970}{s^4 + 147.4s^3 + 1946.6s^2 + 8025.4s + 9261.8}, \\ P_2 &= \frac{-7821s - 78208}{s^4 + 147.4s^3 + 1946.6s^2 + 8025.4s + 9261.8}. \end{split}$$

4 额定风速以上标准H∞恒功率控制问题(Standard H∞ constant power output control problem above rated wind)

图4即为用来求取恒功率鲁棒控制律的转速闭环 反馈框图. 定义输出灵敏度函数

$$S_0 = (I + P_2 K)^{-1}.$$
 (11)

要维持额定风速以上时的发电机组稳态转速恒定,就是要求从w到e的传递函数的 H_{∞} 范数尽量小,

其传递函数为

$$T_{z_1w} = W_e (I + P_2 K)^{-1} P_1 = W_e S_0 P_1$$
, (12)

即要求 $||W_e S_0 P_1||$ 最小.

根据图4,将其转化为图5的标准H_∞控制问题.



图 4 恒功率调节的反馈控制框图





Fig. 5 Standard
$$H_{\infty}$$
 design diagram for constant power regulation

图5中的输入输出传递函数关系可表示为

$$\begin{pmatrix} z_1 \\ z_2 \\ -\omega_g \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -W_e P_1 - W_e P_1 \\ 0 & W_u \\ -P_1 & -P_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v \\ \beta_r \end{pmatrix}.$$
(13)

加权函数W_e的选取就是使得发电机转速在稳态 时维持在额定转速.加权函数W_u是为了限制桨距角 的响应速度,保证其不会饱和,可以根据实际桨距角 的响应速度设计不同的加权函数.

选择加权函数如下:

$$W_u(s) = \frac{10s}{s+100}, \ W_e(s) = \frac{0.1(s+10)}{s+0.1}.$$
 (14)

5 H_∞鲁棒控制器的设计与恒功率控制仿 真(Design of H_∞ robust controller and simulation of the constant power output)

利用MATLAB里面的LMI工具箱对上述的鲁棒 控制问题求解. 基于式(13)求得系统的增广被控对 象的状态空间表达式, 利用ltisys命令构造系统矩 阵, 然后采用连续时间系统H_∞控制器综合问题的 求解器hinflmi进行求解, 即可求得具有稳定零极点 的10阶鲁棒控制器. 图6为所求控制器 K_1 的Bode图.







system with changed wind



图 8 参数变化时发电机的转速 Fig. 8 Speed of the brushless doubly fed generator with changed parameter

图7为风速变化时风力发电机组的动态响应曲 线.图(a)为阶跃变化的风速曲线,风速从12.5 m/s阶 跃变化到13.5 m/s.经过动态调整,可以看出图(b)中 的发电机转速恢复到额定值,而图(c)中的桨距角就 由4.3 rad调整到7.4 rad,桨距角增大减少了输入到风 力发电机组的风功率,从而维持了稳态时输出电功 率的恒定.图8是当风力机的转动惯量下降5%时,无 刷双馈发电机的转速曲线.可以看出,当转动惯量下 降时,鲁棒控制器仍然能够实现转速的额定值控制, 从而实现风力发电机组的恒功率输出控制,表明了 鲁棒控制器对于模型不确定性具有一定的适应性.

6 结论(Conclusion)

本文对额定风速以上时的风力发电机组的恒功 率控制进行了研究.建立了风发电机组在额定风速 以上时某一平衡点处的线性化系统模型,设定控制 变量电磁转矩为额定值,根据H_∞鲁棒控制理论利 用MATLAB里面的LMI工具箱设计了桨距角H_∞控 制器.仿真结果表明该控制器能够实现风速变化时 发电机转速和输出功率的恒定,验证了该算法的有 效性,并且该控制器具有很强的鲁棒性.

6 总结(Conclusion)

利用基于小波变换的电压均值法实现电力信号 特征向量的提取及分类,是一种可行的、简便的以 及具有实用意义的方法,这在设计基于嵌入式系统 的电能质量分析仪具有很好工程意义,具有一定的 应用价值.

参考文献(References):

- 何顺忠.采用Meyer小波变换的电能质量扰动信号的检测与时频 分析[J].黑龙江电力, 2004, 26(6): 454 – 457.
 (HE Sunzhong. Measuring and time-frequency analysis of electric power quality disturbance signal with Meyer wavelet transform[J]. *Heilongjiang Electric Power*, 2004, 26(6): 454 – 457.)
- [2] 刘应梅,白晓民,张红斌,等.基于动态测度的电能质量扰动检测[J].中国电机工程学报,2003,10(23):57-62.

(上接第324页)

参考文献(References):

- 刘其辉,贺益康,赵仁德.变速恒频风力发电系统最大风能追踪控制[J].电力系统自动化,2003,27(20):62-67.
 (LIU Qihui, HE Yikang, ZHAO Rende. The maximal wind-energy tracing control of avariable-speed constant-frequency wind-power generation System[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(20):62-67.)
- [2] 王琦, 陈小虎, 纪延超, 等. 基于双同步坐标的无刷双馈风力发电系统的最大风能追踪控制[J]. 电网技术, 2007, 31(3): 82 87. (WANG Qi, CHEN Xiaohu, JI Yanchao, et al. Maxiamal wind energy tracing control for brushless doubly-fed wind turbine based on dual synchronous coordinates[J]. *Power System Technology*, 2007, 31(3): 82 – 87.)
- [3] YANG J M, WU J, DONG P, et al. Passivity-based control in wind turbine for maximal energy capture[C]//IEEE International Conference on Electric Utility Deregulation, Restructuring and Power Technologies. New York: IEEE Press, 2004, 2: 800 – 803.
- [4] LIMA M L, SILVINO J L. H_∞ Control for a variable-Speed adjustable-pitch wind energy conversion system[C]//IEEE International Symposium on Industrial Electronics. Piscataway: IEEE Press, 1999, 2: 556 – 561.

(LIU Yingmei, BAI Xiaomin, ZHANG Hongbin, et al. The detection of power quality disturbance based on dynamics[J]. *Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering*, 2003, 23(10): 57 – 62.)

[3] 杨建国.小波分析及其工程应用[M].北京:机械工业出版社, 2005.

(YANG Jianguo. Wavelet Analyse and Its Engineering Application[M]. Beijing: Machine Press, 1996.)

- [4] GAOUDA A M. Power quality detection and classification using wavelet-multiresolution signal decomposition[J]. *IEEE Transactions* on Power Delivery, 1998, 14(4): 1469 – 1476.
- [5] GAOUDA A M, SALAMA M M A. Application of multiresolution signal decomposition for monitoring short-duration variations in distribution systems[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2000, 15(2): 478 – 485.
- [6] ANGRISANI L, DAPONTE P. A measurement method based on the wavelet transform for power quality analysis[J]. *IEEE Transactions* on Power Delivery, 1998, 13(4): 990 – 998.
- [5] BIANCHI F D, MANTZ R J, CHRISTIANSEN C F. Power regulation in pitch-controlled variable-speed WECS above rated wind speed[J]. *Renewable Energy*, 2004, 29(11): 1911 – 1922.
- [6] BOUKHEZZAR B, SIGERDIDJANE H. Nonlinear control of variable speed wind turbines for power regulation[C]//Proceedings of the 2005 IEEE Conference on Control applications. Toronto: IEEE Press, 2005: 114 – 119.
- [7] 周克敏, DOYLE J C, GLOVER K. 鲁棒与最优控制[M]. 北京:国防工业出版社, 2002.
 (ZHOU Kemin, DOYLE J C, GLOVER K. Robust and Optimal Control[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2002.)
- [8] 俞立. 鲁棒控制——线性矩阵不等式处理方法[M]. 北京: 清华大学 出版社, 2002.
 (YU Li. Robust Control—Linear Matrix Inequality[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2002.)
- [9] 张先勇. 无刷双馈风力发电机的建模及控制研究[D]. 广州: 华南 理工大学, 2007. (ZHANG Xianyong. Modeling and control of wind energy conversion

system with brushless doubly-fed machine[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2007.)