

文章编号: 1673-5196(2010)06-0074-04

基于动态补偿和逆系统方法的有功功率平滑控制

王晓兰¹, 吴姣¹, 马玲²

(1. 兰州理工大学 电气工程与信息工程学院, 甘肃 兰州 730050; 2. 兰州电力学校, 甘肃 兰州 730070)

摘要: 利用逆系统方法将风电系统模型简化为一阶动态系统, 并设计其逆系统与之级联, 构成伪线性系统. 在此基础上设计误差归一化动态补偿控制器, 分别对桨距角和机械转矩进行动态补偿, 并且针对不同的风机数据, 选择适合的补偿系数以描述补偿强度. 使用 MATLAB/SIMULINK 构建系统模型并进行仿真, 理论分析和仿真结果证明, 该方法通过桨距角的快速动作有效减小了风机机械转矩和输出功率的波动, 从而提高了风速变化条件下风能转换系统的可靠性.

关键词: 风力发电机; 功率平滑控制; 动态补偿; 误差归一化; 逆系统

中图分类号: TM 315 **文献标识码:** A

Smoothing control of active power based on method of dynamic compensation and inverse-system

WANG Xiao-lan¹, WU Jiao¹, MA Ling²

(1. College of Electrical and Information Engineering, Lanzhou Univ. of Tech., Lanzhou 730050, China; 2. Lanzhou Electric Power School, Lanzhou 730070, China)

Abstract: Wind power generation system was simplified as a first-order dynamic model by using inverse-system method. A inverse-system was also designed to cascade with this model, forming a pseudo-linear system. Based on it, a dynamic compensation controller with error normalization was designed to compensate pitch angle and mechanical torque, respectively. According to different data of different wind generators, the compensation factor was set suitably to describe the compensation intensity. The system model was constructed with MATLAB/SIMULINK. Theoretical analysis and simulation results showed that the fluctuations of mechanical torque and output power were decreased effectively by using dynamic compensation instead of inverse-system method. And the reliability of the wind energy converting system was improved in the case of variable wind speed.

Key words: wind power generator; active power smoothing control; dynamic compensation; error normalization; inverse-system

风能是清洁可再生的能源. 由于风本身具有很强的间歇性和随机性, 将其利用于风力发电, 容易导致风机机械转矩和输出功率产生波动, 进而影响电网频率和电压的稳定性. 分析表明, 研究有效的桨距角控制方法, 控制风机输出功率水平, 对风电系统输出电能质量具有重要意义. 当风速超过额定值时, 通常由控制系统调节风力机桨距角来改变风机转速, 由此降低风能捕获量, 将输出功率控制在额定值, 同

时减小风力对风力机的冲击^[1].

目前, 国内外对于风机输出功率水平控制的研究较少^[2-5]. 文献[6]基于奇异摄动理论, 将风电系统简化为具有非仿射型非线性特性的一阶动态系统, 提出了一种逆系统控制器, 与传统的比例积分控制器相比, 该非线性控制器可以减小风速随机变化所引起的风机机械转矩和输出功率的波动. 文献[7]设计了一种非线性桨距角鲁棒控制器, 可以在风速波动时有效控制风电系统的输出功率水平, 并且对参数化和非参数化扰动具有较强的鲁棒性. 上述控制器易于实现和移植, 但在大风速条件下机械转矩及

收稿日期: 2010-07-18

基金项目: 国家自然科学基金(50967001)

作者简介: 王晓兰(1963-)女, 甘肃天水人, 教授.

输出功率在其额定值附近具有较大的波动, 影响风机的可靠运行. 本文基于文献[6]中所设计的桨距角逆系统控制器, 对桨距角及机械转矩进行误差归一化动态补偿, 改进逆系统的非线性控制性能, 从而实现风机输出功率的平滑控制.

1 风机逆系统建模

根据贝兹理论, 可得到风轮产生的机械功率为^[7-9]:

$$P_{wt} = 0.5\pi \rho R^2 C_p(\lambda, \beta) v^3 \quad (1)$$

式中: P_{wt} 为风机轴上的输出功率; R 为风轮半径; ρ 为空气密度; v 为风速; β 为桨距角; λ 为叶尖速比, $\lambda = R\omega/v$, ω 为风轮转动的角速度; $C_p(\lambda, \beta)$ 为风轮的功率系数, 其表达式如下:

$$C_p(\lambda, \beta) = 0.22 \left[\frac{116}{\lambda_i} - 0.4\beta - 5 \right] e^{\frac{12.5}{\lambda_i}} \quad (2)$$

其中

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

风轮产生的风力矩:

$$T_{wt} = \frac{P_{wt}}{\omega} = 0.5\pi \rho R^3 v^2 \frac{C_p(\lambda, \beta)}{\lambda} \quad (3)$$

变速变桨距风力发电系统通常由3个子系统组成: 风机子系统, 桨距角调节子系统以及发电机子系统. 由于大容量风电系统的惯性较大, 发电机子系统的响应速度远快于风机子系统和桨距角调节子系统, 因而在桨距角控制问题中可以认为电磁转矩保持为一常数. 系统建模时忽略电气系统和桨距角调节系统的动态, 其影响以等效转矩扰动加入到风机模型中. 忽略风力机的刚性系数、阻尼系统和齿轮箱的惯性, 变速变桨距风电系统的模型为^[10]

$$\begin{cases} \dot{\omega} = \frac{1}{J} (T_{wt} - T_e') \\ \dot{\beta} = \frac{1}{T_w} (-\beta + \beta_c) \end{cases} \quad (4)$$

式中: $T_e' = K_g T_e$ 为等效风力发电机转矩, K_g 为齿轮箱变比, T_e 为风力发电机的电磁转矩; $J = K_g^2 J_g + J_{wt}$ 为等效风机惯性, J_g 为风力发电机惯性, J_{wt} 为风机惯性; T_w 为桨距角调节器的时间常数; β_c 为桨距角命令值.

根据奇异摄动系统理论, 当各子系统的动态响应速度相差较大时, 在研究“慢”子系统动态时, 可以忽略“快”子系统的动态影响, 认为其响应瞬间完成, 其值始终处于“准稳态”. 忽略“快”子系统的动态影响, 系统的模型降阶为

$$\dot{\omega} = \frac{1}{J} (T_{wt} - T_e') \quad (5)$$

式中: T_e' 为等效发电机转矩的准稳态值, 并令 $T_e' = K_g T_{eN}$, T_{eN} 为发电机的额定电磁转矩; $T_{wt} = 0.5\pi \rho R^3 v^2 \frac{C_p(\lambda, \bar{\beta})}{\lambda}$ 为风机转矩的准稳态值, $\bar{\beta}$ 为桨距角的准稳态值.

选择 $\bar{\beta}$ 为输入变量, ω 为输出变量, 由模型(5)可以得到下式:

$$\bar{\beta} = h^{-1}(\omega, \dot{\omega}) \quad (6)$$

将逆系统(6)与系统(5)级联, 使整个系统呈“伪线性”.

2 补偿控制器的设计

2.1 误差归一化

记 \bar{x} 为变量 x 的稳态值, 则误差为 $\Delta x = x - \bar{x}$, 归一化误差为 $\bar{\Delta x} = \Delta x / \bar{x}$. 由式(4)可得

$$\bar{\Delta T}_{wt} = \gamma \bar{\Delta \omega} + (2 - \gamma) \bar{\Delta v} + \zeta \bar{\Delta \beta} \quad (7)$$

式中 $\bar{\Delta T}_{wt} = \Delta T_{wt} / T_{wt}$

$$\bar{\Delta v} = \Delta v / v$$

$$\bar{\Delta \beta} = \Delta \beta / \bar{\beta}$$

$$\bar{\Delta \omega} = \Delta \omega / \bar{\omega}$$

γ, ζ 的取值取决于系统稳态运行点:

$$\gamma = \bar{\lambda} C'_{p\lambda}(\bar{\lambda}, \bar{\beta}) / C_p(\bar{\lambda}, \bar{\beta}) - 1$$

$$\zeta = \bar{\beta} C'_{p\beta}(\bar{\lambda}, \bar{\beta}) / C_p(\bar{\lambda}, \bar{\beta})$$

$$C'_{p\lambda}(\bar{\lambda}, \bar{\beta}) = \left. \frac{\partial C_p(\lambda, \beta)}{\partial \lambda} \right|_{\lambda=\bar{\lambda}, \beta=\bar{\beta}}$$

$$C'_{p\beta}(\bar{\lambda}, \bar{\beta}) = \left. \frac{\partial C_p(\lambda, \beta)}{\partial \beta} \right|_{\lambda=\bar{\lambda}, \beta=\bar{\beta}}$$

2.2 动态补偿控制

为了改进文献[6]中逆系统控制器的不足, 本文设计了动态补偿器, 利用误差归一化分别对桨距角及机械转矩进行动态补偿. 桨距角和机械转矩控制由下式表示^[11]:

$$\beta_{ref} = \beta_c + k_{\beta} \bar{\Delta \beta} \quad (8)$$

$$T_{ref} = T_{wt} + k_T \bar{\Delta T}_{wt} \quad (9)$$

式中: $k_{\beta} \bar{\Delta \beta}$, $k_T \bar{\Delta T}_{wt}$ 为误差归一化的动态补偿输入; k_{β} , k_T 分别为桨距角补偿系数和转矩补偿系数, 以描述补偿控制的强度. 根据不同的风机数据, 可以选择不同的补偿系数. 加入动态补偿之后的系统控制框图如图1所示.

3 仿真结果及分析

为了验证本文所提出的基于逆系统进行误差归

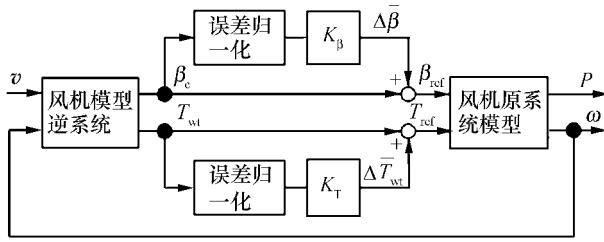


图 1 系统控制框图

Fig. 1 Block diagram of system control

一化动态补偿的优越性, 本文利用 MATLAB/SIMULINK 对该方法进行实验验证, 仿真比较在风速随机变化的情况下, 基于逆系统 (inverse-system, IS) 控制对系统进行动态补偿 (dynamic compensation, DC) 前后的性能. 性能比较如图 3~5 所示.

风机系统参数如下: 桨叶半径 2.5 m, 空气密度 $1.25 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, 风机转动惯量 $0.09 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$, 风机额定转速 32 rad/s , 发电机转动惯量 $0.01 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$; 齿轮箱变比 6.25, 发电机额定转矩 $30 \text{ N} \cdot \text{m}$, 发电机额定功率 6 000 W, 桨距角调节器响应时间为 10 s.

风速在前 200 s 内的变化曲线如图 2 所示. 当风速变化时, 图 3 中所示的桨距角响应曲线也在产生相应变化, 并且动态补偿后的桨距角响应曲线呈现出较大的升降幅度. 图 4~7 为机械转矩和输出功率响应曲线比较, 当风速骤变时, 逆系统控制下的转

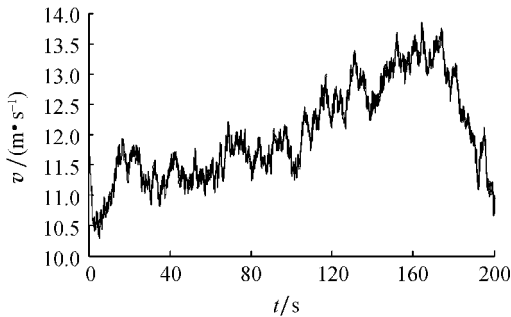


图 2 风速变化曲线

Fig. 2 Variation of wind speed

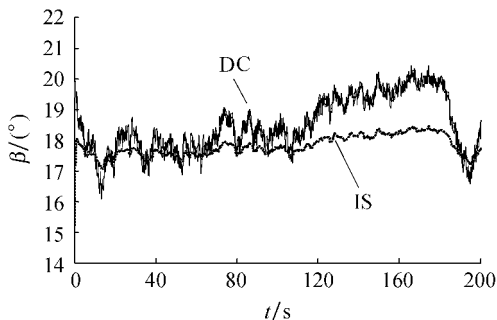


图 3 动态补偿前后的桨距角响应曲线比较

Fig. 3 Comparison of pitch angle response with and without dynamic compensation

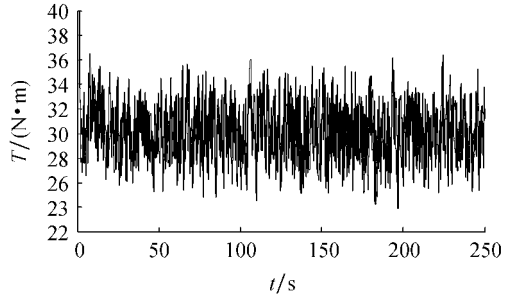


图 4 无动态补偿的机械转矩响应曲线

Fig. 4 Response of mechanical torque without dynamic compensation

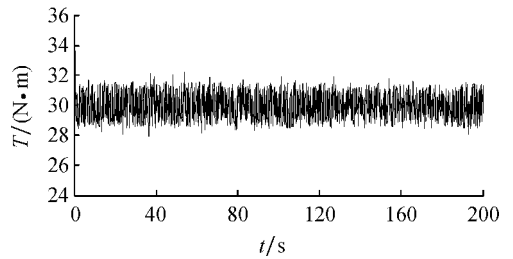


图 5 动态补偿后的机械转矩响应曲线

Fig. 5 Response of mechanical torque with dynamic compensation

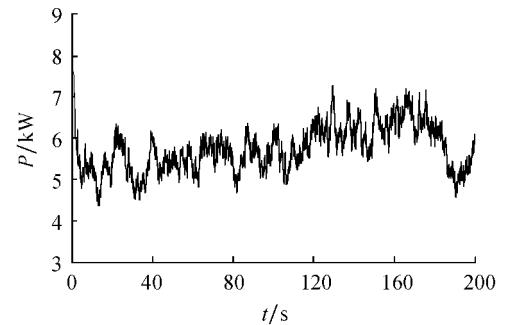


图 6 无动态补偿的输出功率响应曲线

Fig. 6 Response of output power without dynamic compensation

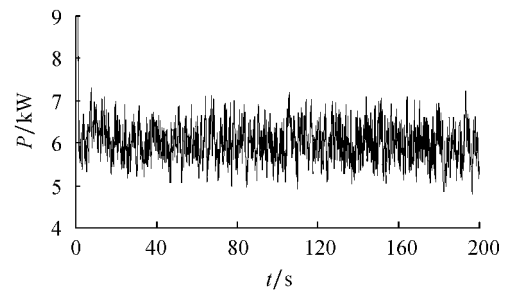


图 7 动态补偿后的输出功率响应曲线

Fig. 7 Response of output power with dynamic compensation
转矩响应和输出功率响应曲线有明显的升降变化, 而动态补偿后的转矩和功率响应曲线较为平滑. 仿真结果的具体数据比较如表 1 所示.

表1 仿真数据比较

Tab. 1 Comparison of simulation data

桨距角调节范围/(°)		机械转矩均值偏差		输出功率均值偏差		风机捕捉风能/($\times 10^7$ J)	
无补偿	有补偿	无补偿	有补偿	无补偿	有补偿	无补偿	有补偿
17.1~18.4	16.2~20.4	2.164 0	1.736 4	6.013 1	4.322 9	2.991 6	3.031 4

由表1可以看到,对桨距角和机械转矩进行误差归一化动态补偿后,通过改变补偿系数,可以减小风机机械转矩和输出功率的波动,同时可以保持风机捕捉的风能量。但桨距角的调节范围有所增大,这是由于动态补偿是通过桨距角的快速动作来实现的,因此加剧了桨距角响应曲线的波动。整体来看,对桨距角和机械转矩进行误差归一化动态补偿,在风速骤变时,风机机械转矩和输出功率并没有受到太大影响,仍然维持在其额定值附近。

4 结论

本文基于风机非线性模型,在逆系统方法控制桨距角的基础上,对系统桨距角及机械转矩进行误差归一化动态补偿,通过理论分析和仿真实验,可得出以下结论:

使用逆系统方法对桨距角进行控制,是基于风机模型非线性而设计的,可以得到更接近实际风机运行的控制效果。在此基础上对桨距角和风机机械转矩进行误差归一化动态补偿,与逆系统方法相比较,有效抑制了风机机械转矩和输出功率的波动,从而提高了风速变化条件下风能转换系统的可靠性。但是,动态补偿是通过桨距角的频繁调节来维持输出功率水平的,对变桨伺服系统的动态性能提出了更高的要求。

参考文献:

[1] SAHIN A D. Progress and recent trends in wind energy [J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2004, 30(5): 501-543.

[2] HORIUCHI N, KAWAHITO T. Torque and power limitation of variable speed wind turbines using pitch control and generator power control [C] // *IEEE Power Engineering Society Summer Meeting*, Vancouver BC; IEEE Press, 2001: 638-643.

[3] SENJYU T, SAKAMOTO R, RASAKI U N, *et al.* Output power leveling of wind turbine generator for all operating regions by pitch angle control [J]. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2006, 21(2): 467-475.

[4] MUNTEANU I, CUTU LULIS N A, BRATCU A I, *et al.* Optimization of variable speed wind power systems based on a LQG approach [J]. *Control Engineering Practice*, 2005, 13(7): 903-912.

[5] SENJYU T, SAKAMOTO R, URASAKI N, *et al.* Output power control of wind turbine generator by pitch angle control using minimum variance control [J]. *Electrical Engineering in Japan*, 2006, 154(2): 10-17.

[6] 耿华, 杨耕. 变速变桨距风电系统的功率水平控制 [J]. *中国电机工程学报*, 2008, 28(25): 131-137.

[7] MISHRA Y, MISHRA S, TRIPATHY M, *et al.* Improving stability of a DFIG-based wind power system with tuned damping controller [J]. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2009, 24(3): 650-660.

[8] BOUKHEZZAR B, LUPU L, SIGUERDIDJANE H, *et al.* Multi-variable control strategy for variable speed, variable pitch wind turbines [J]. *Renewable Energy*, 2007, 32(8): 1273-1287.

[9] 王晓兰, 王耀辉. 调整双馈风力发电机无功功率的风电场并网点电压控制 [J]. *兰州理工大学学报*, 2010, 36(4): 84-89.

[10] 耿华, 杨耕. 基于逆系统方法的变速变桨距风机的桨距角控制 [J]. *清华大学学报: 自然科学版*, 2008, 48(7): 1221-1224.

[11] 沈艳霞, 朱芸, 纪志成. LPV 动态补偿的风能转换系统变桨距控制 [J]. *控制理论与应用*, 2009, 26(11): 1282-1288.