

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2015.02.016

双馈风力发电机组协调多目标非线性控制

徐 枫,王 冰,徐偲喆

(河海大学能源与电气学院,江苏 南京 211100)

摘要:为平抑双馈风力发电机组额定风速以上的转速和功率波动,基于协调无源性方法,提出一种同时考虑桨距角和转子励磁控制的协调控制策略。首先,在分析风力机特性和双馈感应发电机基本电磁关系的基础上,给出风力发电机组桨距角调节、转子励磁控制的四阶系统非线性模型。特别对风能利用系数进行了关于桨距角的多项式拟合,并对拟合的不确定性建模,确保了模型的准确性。其次,由 Lyapunov 方法设计前两阶鲁棒控制器,得到桨距角控制输入,再用协调无源性方法设计励磁控制部分,使得整个系统达到反馈无源,既保证了系统的鲁棒性,又保证了整个系统的渐近稳定性。最后,通过仿真验证了控制策略的控制效果,并与其他控制策略进行了比较,验证了该控制策略的有效性。

关键词:双馈风力发电机组;恒功率控制;协调无源性;不确定性建模

中图分类号:TM614 文献标志码:A 文章编号:1000-1980(2015)02-0184-05

Multi-objective nonlinear coordinated control of doubly-fed induction generators

XU Feng, WANG Bing, XU Sizhe

(College of Energy and Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China)

Abstract: In order to suppress the fluctuations of the rotor speed and electrical power of the doubly-fed induction generator (DFIG) system when it works at a wind speed greater than the rated value, a new coordinated regulation strategy is proposed using the coordinated passivity techniques, with the pitch angle regulation and excitation voltage control simultaneously considered. First, based on analysis of the characteristics of wind turbines and the basic electromagnetic relationship of DFIGs, a four-order nonlinear model was established for regulation of the pitch angle and control of the excitation voltage of DFIGs. In particular, the formula of the wind power utilization coefficient and pitch angle was fitted with the polynomial function, and the uncertainty of the fitting result was modeled, ensuring the high accuracy of the system model. Secondly, pitch angle control was realized based on design of the former two orders of the robust controller using the Lyapunov techniques, and excitation voltage control was achieved based on the coordinated passivity techniques. Thus, the passive feedback of the whole system was obtained, and the system is both robust and tends to be stable. The simulation results validate the effect of the control strategy. The effectiveness of the present control strategy was also verified by its comparison with other control strategies.

Key words: doubly-fed induction generator system; constant power control; coordinated passivity; uncertainty modeling

在常规能源日渐枯竭的今天,风能作为一种最重要的可再生能源,受到人们的广泛关注,但风能的随机性、间接性和不可调度性都给风力发电机组的控制带来了极大困难。因此,风力发电机组的控制技术亟待提高和改进^[1]。

双馈风力发电机组的转子励磁控制和桨距角调节是提高系统稳定性和动态性能的主要手段。励磁控制方面,主要是矢量控制^[2];桨距角调节方面,有传统的PI控制^[3]、模糊控制^[4]和微分几何^[5]等设计方法。励磁控制和桨距角调节都仅仅考虑了风力发电机组的功率调节问题,没有考虑风力发电机组的转速控制问题。

为有效平抑风力发电机组额定风速以上的转速和功率波动,笔者基于 Lyapunov 理论和协调无源性方法^[6-7],提出一种同时考虑桨距角和励磁控制的协调多目标非线性控制策略。考虑到风力机模型中包含强非线性函数,对风能利用系数进行了关于桨距角的多项式拟合,并对拟合后函数的不确定性建模,以保证模型的准确性。

1 变速恒频双馈风力发电机组的数学模型

1.1 风力机不确定性建模

风力机从风能中获得的机械功率 P_m 为

$$P_m = \frac{1}{2} \rho S C_p(\lambda, \beta) v^3 \tag{1}$$

式中: ρ ——空气密度; S ——风轮扫风面积; v ——通过风轮的实际风速; C_p ——风能利用系数,是关于叶尖速比 λ 和桨距角 β 的强非线性函数。

参考邵明燕等^[8]的研究,采用曲线拟合方法得到 C_p 与 β 的多项式关系,用其替代传统的 C_p 强非线性表达式,并进一步建立摄动界函数以保证受控系统的鲁棒性。根据王金铭等^[9]的实测数据,拟合出 C_p 与 β 的曲线如图 1 所示,关系式为

$$C_p(\beta) = \frac{7.582}{10^6} \beta^3 + \frac{3.372}{10^4} \beta^2 - 0.0301\beta + 0.4738 \tag{2}$$

因为 C_p 拟合时会产生误差,因此设计控制器时通过添加摄动界函数来保证受控系统的鲁棒性。参考梅生伟等^[10]的研究,摄动界函数的选取如图 2 所示,具体函数描述为

$$w < |W| = \frac{4}{10^5} \beta^2 - \frac{8}{10^4} \beta + 0.01 \tag{3}$$

式中: w ——绝对拟合误差; W ——摄动界函数。

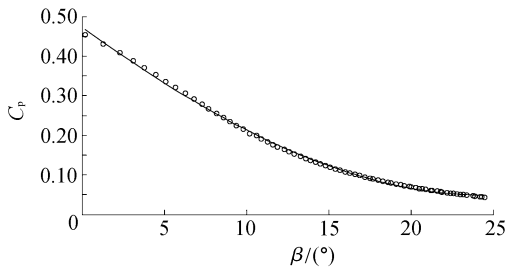


图 1 C_p 与 β 的关系曲线

Fig. 1 Relationship between C_p and β

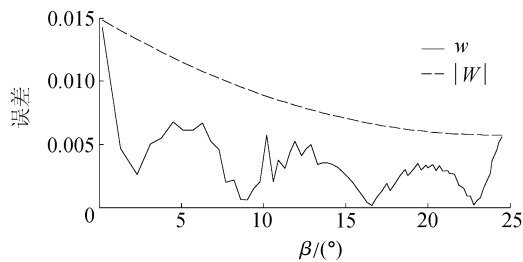


图 2 摄动界函数的选取

Fig. 2 Selection of perturbation function

考虑到风能利用系数的曲线拟合以及拟合误差,将式(1)改写为

$$P_m = \frac{1}{2} \rho S (C_p(\beta) + w) v^3 \tag{4}$$

1.2 传动系统以及感应发电机系统模型

利用矢量控制技术,取 d 轴磁链 φ_{ds} 与定子磁链 φ_s 重合, q 轴磁链 φ_{qs} 置零,即在给定控制约束条件 $\varphi_{ds} = \varphi_s, \varphi_{qs} = 0$ 下,建立双馈风力发电机组两相同步旋转 d 轴、 q 轴坐标系^[11-12]。同时考虑桨距角和双馈感应发电机电磁转矩动态调节,可得双馈风力发电机组的非线性数学模型为

$$\begin{cases} \omega = \frac{a_1}{\omega} (C_p(\beta) + w) - a_2 i_{qr} \\ \dot{\beta} = -b_1 \beta + b_1 \beta_r \\ \dot{i}_{dr} = -c_1 i_{dr} + (\omega_1 - c_2 \omega) i_{qr} + c_3 u_{dr} \\ \dot{i}_{qr} = -d_1 i_{qr} + (\omega_1 - d_2 \omega) (i_{dr} + d_3) + d_4 u_{qr} \end{cases} \tag{5}$$

其中 $a_1 = \frac{1}{2J} \rho S v^3$ $a_2 = \frac{3}{2J} c k_i n_p$ $b_1 = \frac{1}{\tau_\beta}$ $c_1 = d_1 = ab$ $c_2 = d_2 = k_i n_p$

$$d_3 = bc \quad c_3 = d_4 = b \quad a = r_r \quad c = \frac{L_m \varphi_s}{L_s} \quad \frac{1}{b} = L_r - \frac{L_m^2}{L_s}$$

式中: ω ——风轮转速; β_r ——参考桨距角; $i_{dr}、i_{qr}$ ——定子 d 轴和 q 轴电流; $u_{dr}、u_{qr}$ ——定子 d 轴和 q 轴电压; ω_1 ——同步转速; J ——风力发电系统等效转动惯量; φ_s ——定子磁链; r_r ——转子绕组电阻; k_i ——齿轮箱传动比; τ_β ——桨距角响应时间常数; n_p ——极对数; L_m ——定子与转子绕组间互感; L_s ——定子绕组自感; L_r ——转子绕组自感。

2 控制器设计

2.1 控制目标

令 $x_1 = \omega - \omega_0、x_2 = \beta - \beta_0、y_1 = i_{dr} - i_{dr0}、y_2 = i_{qr} - i_{qr0}$, 则系统改写为增量形式^[13-14]:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{a_1}{x_1 + \omega_0} (C_p(x_2 + \beta_0) + w) - a_2 i_{qr0} \\ -b_1 x_2 - b_1 \beta_0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} y_1 + \begin{bmatrix} -a_2 \\ 0 \end{bmatrix} y_2 + \begin{bmatrix} 0 \\ b_1 \end{bmatrix} \beta_r \triangleq \tag{6}$$

$$\begin{aligned} &\mathbf{Q}_1(\mathbf{x}) + \mathbf{Q}_2(\mathbf{x}) y_1 + \mathbf{Q}_3(\mathbf{x}) y_2 + \mathbf{T} \beta_r \\ \begin{bmatrix} \dot{y}_1 \\ \dot{y}_2 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} -c_1 \\ \omega_1 - d_2(x_1 + \omega_0) \end{bmatrix} y_1 + \begin{bmatrix} \omega_1 - c_2(x_1 + \omega_0) \\ -d_1 \end{bmatrix} y_2 + \\ &\begin{bmatrix} -c_1 i_{dr0} + [\omega_1 - c_2(x_1 + \omega_0)] i_{qr0} \\ -d_1 i_{qr0} + (i_{dr0} + d_3) [\omega_1 - d_2(x_1 + \omega_0)] \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c_3 \\ 0 \end{bmatrix} u_{dr} + \begin{bmatrix} 0 \\ d_4 \end{bmatrix} u_{qr} \end{aligned} \tag{7}$$

式中: $x_1、x_2、y_1、y_2$ ——4 个状态变量; ω_0 ——风轮转速的稳定运行点; β_0 ——风力机桨距角的稳定运行点; $i_{dr0}、i_{qr0}$ ——定子 d 轴、 q 轴电流稳定运行点; $\mathbf{x}$ ——二阶状态向量; $\mathbf{Q}_1(\mathbf{x})、\mathbf{Q}_2(\mathbf{x})、\mathbf{Q}_3(\mathbf{x})$ ——关于状态向量的 3 个函数矩阵; $\mathbf{T}$ ——控制量 β_r 的系数矩阵。

对于系统(6)~(7), 选择 (u_{dr}, y_1) 和 (u_{qr}, y_2) 为 2 组输入输出对, 将系统设计分为两部分: 首先, 利用 β_r 稳定前两阶零动态系统; 然后, 再设计 $u_{dr}、u_{qr}$ 使整个系统达到渐进稳定。

2.2 控制策略推导

2.2.1 $\mathbf{x}$ 子系统控制器设计

利用 Lyapunov 方法设计 β_r 使前两阶零动力系统稳定。取 Lyapunov 函数:

$$V_1 = \frac{1}{2} x_1^2 + \frac{1}{2} (x_2 + \beta_0)^2 \tag{8}$$

设计控制律

$$\beta_r = \frac{1}{b_1(x_2 + \beta_0)} \left\{ -\frac{x_1}{x_1 + \omega_0} [a_1 C_p(x_2 + \beta_0) + a_1 |W|] + a_2 x_1 i_{qr0} + 2b_1 \beta_0 x_2 + b_1 \beta_0^2 \right\} \tag{9}$$

2.2.2 利用协调无源性完成系统设计

在桨距角控制 β_r 设计的基础上, 对励磁控制部分进行反馈无源性设计, 即设计 u_{dr} 和 u_{qr} 来稳定整个系统。取存储函数:

$$V = V_1 + \frac{1}{2} y_1^2 + \frac{1}{2} y_2^2 \tag{10}$$

设计控制律

$$\begin{cases} u_{dr} = \frac{1}{c_3} \left\{ c_1 i_{dr0} - [\omega_1 - c_2(x_1 + \omega_0)] (y_2 + i_{qr0}) - \frac{\partial V_1}{\partial \mathbf{x}} \mathbf{Q}_2(\mathbf{x}) + v_1 \right\} \\ u_{qr} = \frac{1}{d_4} \left\{ d_1 i_{qr0} - [\omega_1 - d_2(x_1 + \omega_0)] (y_1 + i_{dr0} + d_3) - \frac{\partial V_1}{\partial \mathbf{x}} \mathbf{Q}_3(\mathbf{x}) + v_2 \right\} \end{cases} \tag{11}$$

其中 $v_1 = -\varphi_1 y_1 \quad v_2 = -\varphi_2 y_2$

式中: $\varphi_1、\varphi_2$ ——任意大于 0 的常数。

2.3 系统稳定性证明

将上述设计结果归纳为以下定理。

定理 1 对于系统(6)~(7),设计桨距角与励磁控制 β_r 、 u_{dr} 、 u_{qr} 分别如式(9)、(11)所示,则系统具有反馈无源性。进一步,当 $v_i=-\varphi_i y_i, \varphi_i>0(i=1,2)$,且满足 $x_2+\beta_0\neq 0$ 时,闭环系统可实现渐近稳定。

证明 已知系统(6),设计控制 Lyapunov 函数 $V_1=\frac{1}{2}x_1^2+\frac{1}{2}(x_2+\beta_0)^2$,带入式(9),可以得到:

$$\dot{V}_1 = x_1 \dot{x}_1 + (x_2 + \beta_0) \dot{x}_2 < -b_1 x_2^2 < -\alpha(\|x\|) \tag{12}$$

由无源性定理^[6]可知,系统(6)的零动态部分达到稳定,满足了协调无源性方法^[6-7]的设计要求。取 $V=V_1+\frac{1}{2}y_1^2+\frac{1}{2}y_2^2$,由无源性设计方法可知,控制率 u_{dr} 、 u_{qr} 为式(11)。这时有

$$\dot{V} = \frac{\partial V_1}{\partial x} x \Big|_{y_1=0, y_2=0} - c_1 y_1^2 - d_1 y_2^2 + v_1 y_1 + v_2 y_2 \leq v_1 y_1 + v_2 y_2 \tag{13}$$

所以闭环系统是反馈无源的。如果取 $v_i=-\varphi_i y_i(i=1,2), \varphi_i>0(i=1,2)$,则有 $\dot{V}\leq 0$,由无源性设计方法可知 $y_i\rightarrow 0(t\rightarrow\infty, i=1,2)$,考查限制在 $y_i=0(i=1,2)$ 不变集,将式(11)代入式(7)得

$$\begin{cases} -\frac{\partial V_1}{\partial x} Q_2(x) + v_1 = 0 \\ -\frac{\partial V_1}{\partial x} Q_3(x) + v_2 = -a_2 x_1 = 0 \end{cases} \tag{14}$$

可得 $x_1(t)\rightarrow 0(t\rightarrow\infty)$ 。将式(9)带入 $\dot{x}_2=-b_1 x_2-b_1 \beta_0+b_1 \beta_r$ 得 $\dot{x}_2=\frac{b_1 x_2^2}{x_2+\beta_0}$ 。若 $x_2+\beta_0\neq 0$,由 LaSalle 不变集定理^[6]可知 $x_2(t)\rightarrow 0(t\rightarrow\infty)$,所以在本文所设计的控制方案下,系统的所有状态都可以达到渐近稳定。

3 仿 真 验 证

为了验证设计控制器的正确性,根据文献[15]选择如下参数对系统进行仿真验证:风机额定功率 $P_e^*=90\text{ kW}$,定子电压 $U_s=220\text{ V}$,风轮半径 $R=12\text{ m}$, $\omega_0=10\text{ rad/s}$, $r_r=0.816\text{ }\Omega$, $L_r=L_s=150\text{ mH}$, $L_m=146\text{ mH}$, $J=5000\text{ kg}\cdot\text{m}^2$, $\rho=1.25\text{ kg/m}^3$, $k_i=15$, $n_p=2$,额定风速为 12 m/s , $\tau_\beta=0.1\text{ s}$ 。

仿真使用如图 3 所示的风速。图 4~5 分别给出了在图 3 风速下笔者提出的协调无源性控制与 PI 控制下风力发电机组输出的风轮转速、电功率的对比曲线。

通过以上仿真可以看出,与仅考虑桨距角调节的 PI 控制时的系统相比,笔者所提出的协调无源性控制策略不仅能很好地维持输出功率的恒定,而且能够有效平抑系统的转速波动。仅考虑桨距角的 PI 控制在风速波动时,仅仅通过调节桨距角来控制输出功率的稳定,其电磁转矩被设为额定值,完全不参与控制,而桨距角的机械响应速度较慢,在桨距角响应的时间里,风力发电机组的输出电功率会出现较大波动。而笔者提出的协调无源性控制通过对桨距角和电磁转矩的同时调整,使桨距角与电磁转矩相互协调,有效减小了桨距角调整时间内的功率波动,使得控制更加快速、有效。

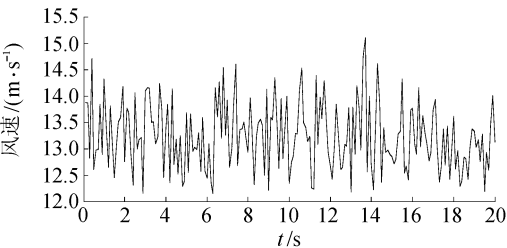


图 3 风速变化
Fig. 3 Change of wind speed

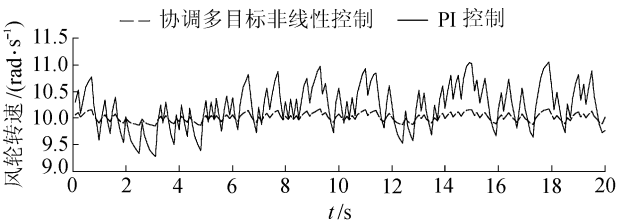


图 4 风轮转速对比曲线
Fig. 4 Contrast of rotor speed curves

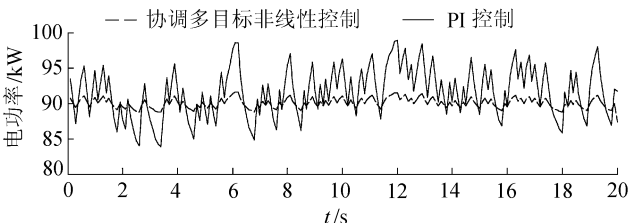


图 5 电功率对比曲线
Fig. 5 Contrast of electrical power curves

4 结 语

考虑到风力机模型中包含强非线性函数,通过曲线拟合方法,对风能利用系数做了关于桨距角 β 的多项式拟合,使系统的脉络以及各变量之间的控制与被控制关系更加清晰,减小了控制器的设计难度;同时引入了摄动界函数,既消除了拟合时的误差,又保证了受控系统的鲁棒性。风力机工作在额定风速以上时,与传统PI控制方法相比,笔者提出的控制策略更加有效。对桨距角和励磁电压两个控制量加以协调控制,不仅能更有效更快速地稳定风力机出力,而且对风力机的转速波动也起到了更显著的抑制作用。

参考文献:

- [1] 霍志红,郑源,左璐,等. 风力发电机组控制技术[M]. 北京:中国水利水电出版社,2010.
- [2] 卞松江,吕晓美,相会杰,等. 交流励磁变速恒频风力发电系统控制策略的仿真研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(16): 57-62. (BIAN Songjiang, LYU Xiaomei, XIANG Huijie, et al. Modeling and simulation of AC excited VSCF in wind power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(16): 57-62. (in Chinese))
- [3] 高峰,徐大平,吕跃刚. 大型风力发电机组的前馈模糊-PI变桨距控制[J]. 动力工程, 2008, 28(4): 537-542. (GAO Feng, XU Daping, LYU Yuegang. Feed forward fuzzy-PI pitch-control for large-scale wind turbines[J]. Journal of Power Engineering, 2008, 28(4): 537-542. (in Chinese))
- [4] 孔屹刚,王志新. 大型风力发电机组模糊滑模鲁棒控制器设计与仿真[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(14): 136-141. (KONG Yigang, WANG Zhixin. Design and simulation of fuzzy sliding-mode robust controller for large wind generating unit[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(14): 136-141. (in Chinese))
- [5] 夏长亮,宋战锋. 变速恒频风力发电系统变桨距自适应抗扰控制[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(14): 91-95. (XIA Changliang, SONG Zhanfeng. Pitch control of variable speed constant frequency wind turbines based on active-disturbance-rejection controller[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(14): 91-95. (in Chinese))
- [6] KHALIL H K. Nonlinear systems[M]. New Jersey: Prentice Hall, 2002.
- [7] LARSEN M, JANKOVIC M, KOKOTOVIC P V. Coordinated passivation designs [J]. Automatica, 2003, 39(2): 335-341.
- [8] 邵明燕,刘瑞叶,吕殿君. 微网孤立运行时的调频策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(5): 60-65. (SHAO Mingyan, LIU Ruiye, LYU Dianjun. Study on frequency regulation scheme for islanded microgrid[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(5): 60-65. (in Chinese))
- [9] 王金铭,卢爽瑄,何新,等. 大型风力发电机电能利用系数参数拟合的研究[J]. 太阳能学报, 2012, 33(2): 221-225. (WANG Jinming, LU Shixuan, HE Xin, et al. Study on parameters matching of rotor power coefficient for large scale wind turbine[J]. Actaenergiesolaris Sinica, 2012, 33(2): 221-225. (in Chinese))
- [10] 梅生伟,申铁龙,刘康志. 现代鲁棒控制理论与应用[M]. 北京:清华大学出版社, 2008.
- [11] 李啸骢,田友飞,徐俊华,等. 变速恒频双馈风电机组恒功率非线性控制[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(23): 47-51. (LI Xiaocong, TIAN Youfei, XU Junhua, et al. A nonlinear control of constant power regulation for variable-speed constant-frequency wind turbine driven DFIG system[J]. Automation of Electric Power System, 2011, 35(23): 47-51. (in Chinese))
- [12] LIN W. Feedback stabilization of general nonlinear control systems: a passive system approach[J]. Systems & Control Letters, 1995, 25(1): 41-52.
- [13] 邹彪,王杰. 静止同步补偿装置与发电机励磁的无源协调反步控制设计[J]. 电网技术, 2011, 35(3): 74-79. (ZOU Biao, WANG Jie. Coordinated control for STATCOM and generator based on passivity and backstepping technique[J]. Power System Technology, 2011, 35(3): 74-79. (in Chinese))
- [14] 王冰,季海波,陈欢,等. 汽轮发电机励磁与汽门协调无源性控制[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(5): 104-109. (WANG Bing, JI Haibo, CHEN Huan, et al. The coordinated passivity techniques for excitation and steam-valving control of generator[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(5): 104-109. (in Chinese))
- [15] 崔双喜,王维庆,周顺平. 大型风力发电机组独立变桨多目标控制[J]. 可再生能源, 2014, 32(5): 636-641. (CUI Shuangxi, WANG Weiqing, ZHOU Shunpin. Independent variable pitch multi-objective control for large-scale wind turbine[J]. Renewable Energy Resources, 2014, 32(5): 636-641. (in Chinese))