

变桨距风力发电机组恒功率反馈线性化控制

杨俊华¹, 郑俭华¹, 杨梦丽², 吴 捷³

(1. 广东工业大学 自动化学院, 广东 广州 510006; 2. 信阳供电公司, 河南 信阳 464000;

3. 华南理工大学 电力学院, 广东 广州 510640)

摘要: 在额定风速以上时, 为保证风电机组的安全稳定运行, 需要降低风力机捕获风能, 使风力机的转速及功率维持在额定值, 基于微分几何反馈线性化方法, 提出变桨距风力发电机组恒功率控制策略. 建立了风力机的仿射非线性模型, 采用微分几何反馈线性化变换实现全局精确线性化; 根据新的线性化模型, 以风力机转速为输出反馈变量, 叶片桨距角为输入控制变量, 设计桨距角控制器; 在风速高于额定值时调节风力机维持在额定转速, 从而实现额定风速以上的恒功率控制. 仿真结果表明, 所提控制策略能较好地解决变桨距风力发电机组额定风速以上的恒功率控制问题, 控制方法具有较好的适应性和鲁棒性.

关键词: 风力发电机组; 恒功率控制; 反馈线性化; 微分几何; 全局精确线性化; 变桨距

中图分类号: TM315, TP273

文献标识码: A

Feedback linearization control of constant output power for variable pitch wind turbine

YANG Jun-hua¹, ZHENG Jian-hua¹, YANG Meng-li², WU Jie³

(1. College of Automation Science and Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou Guangdong 510006, China;

2. Xinyang Grid Company, Xinyang Henan 464000, China;

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

Abstract: When the wind speed exceeds the rated value, the wind power captured by the wind turbine must be reduced to guarantee the wind turbine to operate in the safe and stable status. A control scheme for limiting the power of the variable pitch wind turbine based on the differential geometry feedback linearized theory is proposed to keep the rotational speed and output power at the rated value. An affine nonlinear model of the wind turbine is developed and then globally exactly linearized by a differential geometry transformation. With the new linearized model, we design a novel pitch angle controller in which the output feedback variable is the rotational speed and the input control variable is the blade pitch angle. When the wind speed exceeds the rated value, the pitch angle controller changes the blade pitch angle to reduce the rotational speed back to the rated value for ensuring the constant output power. Simulation results show that, when the wind speed is above the rated value, the proposed control strategy effectively implements the constant output power control for the variable pitch wind turbine with fine flexibility and robustness.

Key words: wind turbine; power limitation control; feedback linearization; differential geometry; globally precise linearization; variable pitch

1 引言(Introduction)

日本大地震引起的核泄漏事故以及墨西哥湾的漏油事件严重影响了世界各国的能源政策, 风能、太阳能等各类可再生的新能源获得了突飞猛进的发展. 截止到2011年年底, 全球风电装机总容量已达到237669MW, 新增装机相当于430TWh的年发电量, 占全球总发电量的2.5%, 已超过世界第6大经济体——英国全年的用电需求. 中国2011年新增装机17631MW, 占全球年度新增装机容量的46%, 总

装机容量达到62364MW, 2010年开始超过美国成为全球风电装机容量最大的国家, 并已成为国际风能产业的中心^[1].

不同风速状态下, 风力发电机组有不同的运行控制方式, 低风速时, 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. 额定风速以上时, 为保证机械部件和电气元件的安全性, 风力机的最高转速及最大输出功率都不能够超过额定值. 失速型风电机组可通过叶片

收稿日期: 2011-06-09; 收修改稿日期: 2012-06-12.

基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目(60534040); 广东省教育厅专项重点实验室资助项目(IDSYS200701); 广东省科技计划资助项目(2009B010900052); 广东省自然科学基金资助项目(S2012040007895); 广东省绿色能源技术重点实验室开放基金项目(2012003).

翼形设计保证这一过程的自动完成:而变桨距风电机组则需要改变叶片的桨距角来实现,但目前的这类研究多集中于模型研究和常规PID控制.风速、风向的随机性,实际流过风力机的风速会在很大范围内变化.考虑到风力机空气动力学模型的强非线性,针对某一特定风速状况下设计的控制器及参数无法在风速大范围变化的情况下获得满意的控制性能.

近年来,在控制界学者的不懈努力下,基于微分几何的非线性控制策略获得了长足进步,成功解决了电机驱动、电力电子、电力系统等领域的非线性控制问题^[2-8],但在风力发电系统中的应用并不多见^[9-15].文献[9]推导了主动失速型风力机的仿射性非线性模型,采用微分几何方法实现精确线性化,并在此基础上设计非线性控制器,通过控制失速型叶片的桨距角实现额定风速以上的恒功率输出.文献[10]将微分几何精确线性化方法应用于水平轴恒速风力发电系统中,根据获得的线性化模型设计控制器,基于测得的风力机转速、桨距角和发电机电磁转矩,产生控制律以实现额定风速以上的恒功率控制.文献[11]从空气动力学角度,介绍了通过降低风力机转速以实现变速风电机组恒功率控制的原理,并设计了基于微分几何反馈线性化的恒功率控制器,提供了另一种风力机恒功率控制思路.文献[12]采用风力机桨距角和晶闸管触发角作为输入,设计了基于微分几何的双输入控制器,实现了变速变桨距风力机的恒功率控制.文献[13]提出双馈发电机非线性多输入多输出状态反馈解耦控制方案,通过非线性坐标变换和非线性状态反馈,使双馈发电机的磁链、转速子系统实现动态完全解耦,从而获得了优于传统矢量控制的效果.文献[14]应用全局渐进稳定的非线性状态反馈和极点配置方法构建控制器,实现了鼠笼型异步风力发电机组的软并网,有效减小冲击电流和电压波动.文献[15]应用状态反馈线性化方法研究了风力机的最大风能捕获控制,消除了扰动和噪声的影响.

本文基于微分几何反馈线性化理论,针对额定风速以上时变速变桨距风力发电机组的恒功率控制问题,设计了非线性桨距角控制器,并通过仿真验证了控制器具有良好的性能.

2 变速恒频双馈发电系统的机理模型(Mechanism model of variable speed constant frequency doubly-fed wind generation system)

当忽略电磁响应的动态过程时,风力发电系统可分为风力机叶轮的空气动力系统、增速齿轮箱传动系统、交流励磁双馈发电机、运行控制系统,如图1所示.图中: V 为流过风轮叶片的风速, T_r 为风力

机叶轮产生的机械转矩, ω_r 为风力机转速, T_e 为发电机的电磁转矩, ω_g 为发电机的旋转角速度.风力机的叶轮部分将风能转换为旋转机械能,增速齿轮箱将叶轮吸收的机械能输入到发电机转子上,然后通过电磁感应将电能经发电机送入电网.

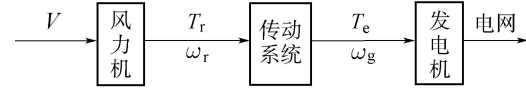


图1 风力发电系统结构

Fig. 1 Structure of the wind energy generation system

2.1 空气动力模型(Aerodynamic model)

根据空气动力学的Betz理论^[16],

$$P_r = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 C_p(\lambda, \beta) V^3, \quad (1)$$

$$\lambda = \frac{\omega_r R}{V}, \quad (2)$$

$$J_r \frac{d\omega_r}{dt} = T_r - T_{ls}, \quad (3)$$

$$T_r = \frac{P_r}{\omega_r} = \frac{1}{2\omega_r} \rho \pi R^2 C_p(\lambda, \beta) V^3. \quad (4)$$

式(1)–(4)中: P_r 为风力机捕获的机械能, ρ 为空气密度, R 为风轮半径, $C_p(\lambda, \beta)$ 为风能利用系数,与风力机结构密切相关,不太可能对每一种不同类型的风力机都建立一个近似的曲线,通常可采用式(5)的特性曲线描述风力机的特性^[17],该曲线具有一定的普适性,只要调整某些特性参数,即可模拟不同类型风力机.

$$C_p(\lambda) = c_1 \left(\frac{c_2}{\lambda_i} - c_3 \beta - c_4 \right) e^{-\frac{c_5}{\lambda_i}} + c_6 \lambda, \quad (5)$$

其中

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

桨距角 β 变化的执行机构采用一阶惯性环节来模拟:

$$\frac{d\beta}{dt} = \frac{1}{T_\beta} (\beta_r - \beta), \quad (6)$$

其中: T_β 为时间常数, β_r 为桨距角参考输入.

2.2 齿轮传动模型(Gear drive model)

传动系统的结构如图2所示,与风力机相连的低速轴为主传动轴,与发电机相连的高速轴为次传动轴,两者通过增速齿轮箱连接.为便于分析,忽略传动轴的柔性和摩擦损耗^[18].

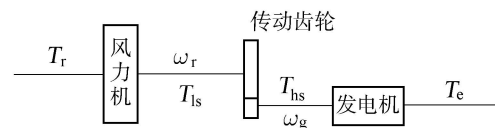


图2 传动系统结构

Fig. 2 Structure of the drive chain

假定增速齿轮箱完全刚性, 其特性可表示为

$$k = \frac{T_{ls}}{T_{hs}} = \frac{\omega_g}{\omega_r}, \quad (7)$$

其中: k 为齿轮传动比, ω_g 与 ω_r 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转矩。

2.3 双馈发电机(Doubly-fed induction generator)

双馈发电机为

$$J_g \frac{d\omega_g}{dt} = T_{hs} - T_e, \quad (8)$$

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; T_{hs} 为次传动轴上的转矩, 即输入的机械转矩; T_e 为双馈发电机的反转矩, 即总的制动转矩, 包括电磁转矩和空载惯性转矩。

2.4 系统整体模型(Whole model of system)

为简化分析, 认为传动轴是刚性的, 忽略变形及摩擦损耗, 并将与高速轴相联的发电机侧的转矩及转动惯量归算到与低速轴相耦合的风力机叶轮一侧, 传动系统的总等效转动惯量为^[12]

$$J_v = J_r + k^2 J_g, \quad (9)$$

其中: J_r 为风力机转动惯量; J_g 为电机转动惯量; k 为齿轮传动比。风电系统的模型为

$$J_v \dot{\omega}_r = T_r - kT_e, \quad (10)$$

$$\frac{d\beta}{dt} = \frac{1}{T_\beta} (\beta_r - \beta). \quad (11)$$

3 反馈线性化理论(Feedback linearization theory)

设有单输入单输出仿射非线性系统如下^[19-20]:

$$\begin{cases} \dot{x} = f(x) + g(x)u, \\ y = h(x). \end{cases} \quad (12)$$

该系统反馈线性化控制的基本思想是反复对输出变量 y 求导, 直至输入变量 u 在 y 的表达式中出现, 然后设计 u 以抵消非线性项。具体方法如下:

首先对输出 y 求导得

$$\dot{y} = \frac{\partial h(x)}{\partial x} = L_f h(x) + L_g h(x)u. \quad (13)$$

如果公式(13)中的 $L_g h(x) \neq 0$, 则 y 的表达式中包括输入变量 u , 若取输入量为

$$u = \frac{1}{L_g h(x)} [-L_f h(x) + v], \quad (14)$$

可得到 y 与 v 的线性控制关系为 $\dot{y} = v$ 。

反之, 如果公式(13)中的 $L_g h(x) = 0$, 则继续对 \dot{y} 求导, 得

$$\ddot{y} = \frac{\partial^2 h(x)}{\partial x^2} = L_f^2 h(x) + L_g L_f h(x)u. \quad (15)$$

如果 $L_g L_f h(x)$ 仍然为零, 那么继续求导直至 $L_g L_f^{n-1} h(x) \neq 0$ 为止, 此时有

$$y^{(n)} = \frac{\partial^n h(x)}{\partial x^n} = L_f^n h(x) + L_g L_f^{n-1} h(x)u. \quad (16)$$

最终可得实现线性控制关系 $y^{(n)} = v$ 的控制率为

$$u = \frac{1}{L_g L_f^{n-1} h(x)} [-L_f^n h(x) + v]. \quad (17)$$

4 非线性控制器设计(Design the nonlinear controller)

由于风力发电系统是一个大范围强风速扰动的非线性系统, 可利用反馈线性化法将整个系统进行线性化。

4.1 系统控制目标(Control goal of system)

根据风力发电机组的运行特性, 额定风速以上的恒功率控制, 就是在风力机组稳态运行时控制其转速和电磁转矩维持在额定值。因此可设定电磁转矩固定为额定值, 通过变桨距控制调节风力机转速, 实现恒功率输出, 这样恒功率控制问题就转化为恒转速控制。以桨距角为输入, 发电机的转速差为反馈, 通过改变桨距角调节风力机的风能利用系数, 从而在给定的输入风速下, 使风力机所捕获的风能功率维持在额定值, 如图3所示。

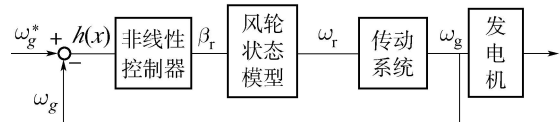


图3 风电系统的反馈线性化控制

Fig. 3 Feedback linearization control of wind energy conversion system

4.2 风力发电系统的仿射模型(Affine model of wind energy conversion system)

选择风轮角速度 ω_r 为系统状态变量, 桨距角 β_r 为输入控制量, 风轮角速度额定值与实际值的偏差为输出量, 于是系统的非线性仿射模型为

$$\begin{cases} \dot{x} = f(x) + g(x)u, \\ y = h(x) = \omega_r^* - \omega_r, \end{cases} \quad (18)$$

其中:

$$\begin{aligned} x &= \begin{bmatrix} \omega_r \\ \beta \end{bmatrix}, \quad u = \beta_r, \quad g(x) = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{T_\beta} \end{bmatrix}, \\ f(x) &= \begin{bmatrix} \frac{C_p(\lambda, \beta) \rho \pi R^2 V^3}{2J_v x_1} - kT_e \\ -\frac{1}{T_\beta} x_2 \end{bmatrix}. \end{aligned}$$

4.3 线性化条件检验(Inspection of linearization condition)

对输出函数微分得

$$\frac{\partial h(x)}{\partial x} = [1 \ 0], \quad (19)$$

则输出函数关于 $f(x)$ 和 $g(x)$ 的李导数为 $L_f h(x) = f_1(x)$, $L_g h(x) = 0$.

$L_f h(x)$ 的雅克比矩阵为

$$\frac{\partial L_f h(x)}{\partial x} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1(x)}{\partial x_1} & \frac{\partial f_1(x)}{\partial x_2} \end{bmatrix}, \quad (20)$$

其中:

$$\frac{\partial f_1(x)}{\partial x_1} = -\frac{C_p(\lambda, \beta) \rho \pi R^2 V^3}{x_1^2 2 J_v} + \frac{\rho \pi R^2 V^3}{2 J_v x_1} \frac{\partial C_p(\lambda, \beta)}{\partial x_1},$$

则有

$$\begin{aligned} L_f^2 h(x) &= \frac{\partial L_f h(x)}{\partial x} f(x) = \\ &= \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1(x)}{\partial x_1} & \frac{\partial f_1(x)}{\partial x_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_1(x) \\ f_2(x) \end{bmatrix}, \\ L_g L_f h(x) &= \frac{\partial L_f h(x)}{\partial x} g(x) = \frac{1}{T_\beta} \frac{\partial f_1(x)}{\partial x_2} \neq 0. \end{aligned}$$

因此,系统的相对阶为2,与系统的阶数相等,满足全局线性化条件.

4.4 控制器的设计(Design controller)

选择新的坐标系为

$$\begin{cases} z_1 = h(x), \\ z_2 = L_f h(x) = f_1(x). \end{cases} \quad (21)$$

由此可组成新的线性坐标方程

$$\begin{cases} \dot{z}_1 = z_2, \\ \dot{z}_2 = v, \end{cases} \quad (22)$$

其中 $v = L_f^2 h(x) + L_g L_f h(x)u$.

对新的线性坐标方程进行极点配置,可以得到反馈量: $v^* = k_f z(x) = -k_1 z_1 - k_2 z_2$,则可得到非线性反馈输入为

$$u = \beta_r = \frac{1}{L_g L_f h(x)} (v^* - L_f^2 h(x)). \quad (23)$$

整个控制器的结构用图4表示.

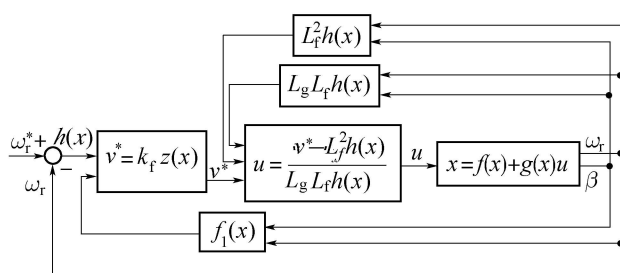


图4 非线性控制器结构

Fig. 4 Structure of the nonlinear controller

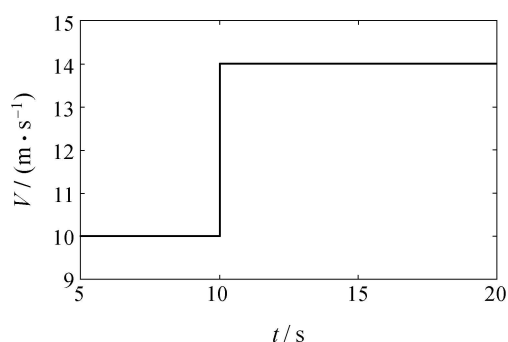
5 仿真结果及分析(Simulation results and analysis)

本系统采用的变桨距交流励磁双馈发电机组的参数如下: 风力机的功率为300 kW, 风轮半径为24 m, 转速范围0~22.3 r/min, 风轮转动惯量 $J_r = 1600 \text{ kg/m}^2$, 传动比 $k = 67$, 发电机同步转速为1500 r/min, 转动惯量 $J_g = 49 \text{ kg/m}^2$. 假定空气密度 ρ 为1.2. 根据文献[17]的相关结论, 式(5)中的参数选择如下:

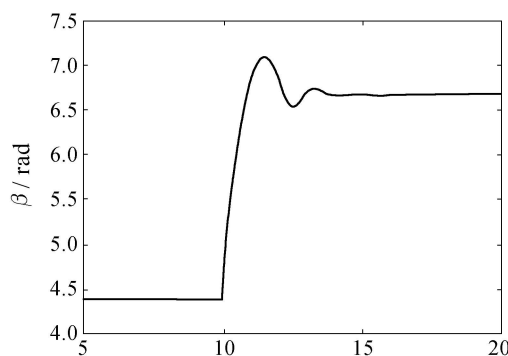
$$c_1 = 0.5176, c_2 = 116, c_3 = 0.4,$$

$$c_4 = 5, c_5 = 21, c_6 = 0.0068.$$

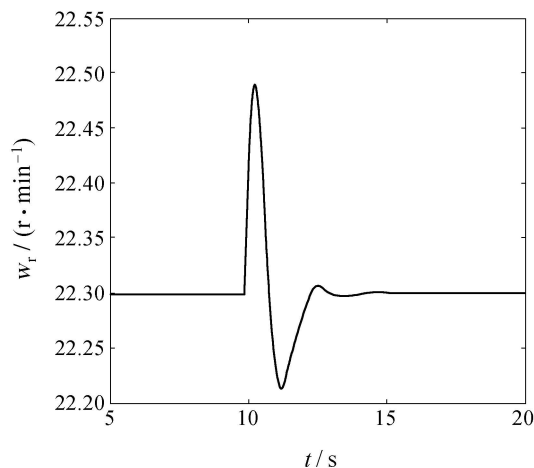
图5为风速从10 m/s阶跃跃升到14 m/s时的仿真结果.



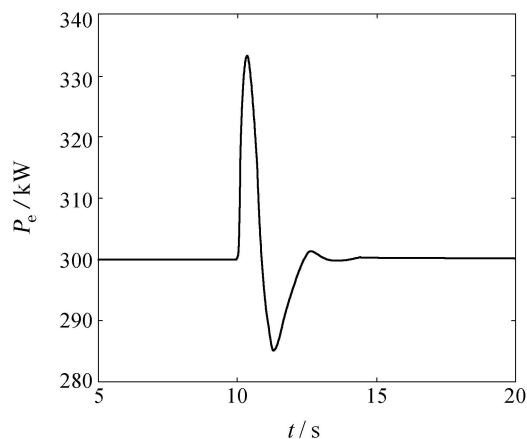
(a) 风速



(b) 桨距角



(c) 风轮转速



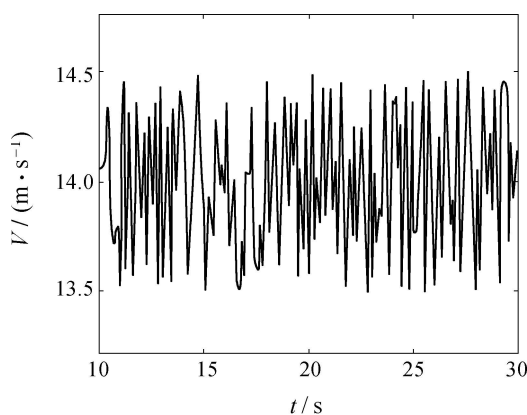
(d) 发电机输出功率

图 5 风速由 10 m/s 阶跃到 14 m/s 时的响应曲线

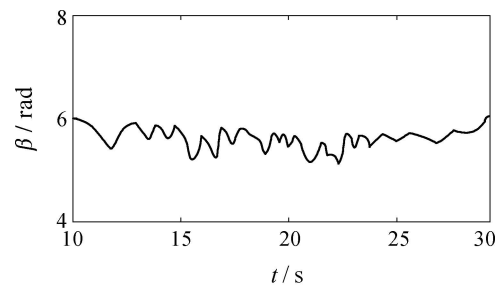
Fig. 5 Responses curves when wind speed jumps from 10 m/s to 14 m/s

当风速上升时, 风力机所获得的驱动力矩增大, 风力机转速上升(图 5(c)), 此时的风力机转速已经高于额定转速, 计算可得到转速偏差并将该偏差输入到非线性控制器中, 控制器给出控制指令, 使风力机叶片的桨距角增大以减小风轮所捕获的风能(图 5(b)), 风力机转速开始下降, 当风力机所获得的空气动力转矩与发电机电磁转矩相一致时, 风力机转速最终将稳定在额定转速附近, 即可实现风电机组的恒转速控制. 由于在整个调节过程中发电机的电磁转矩维持不变, 因此发电机输出功率与风力机转速呈线性的比例关系, 从而实现了额定风速以上的恒功率控制(见图 5(d)).

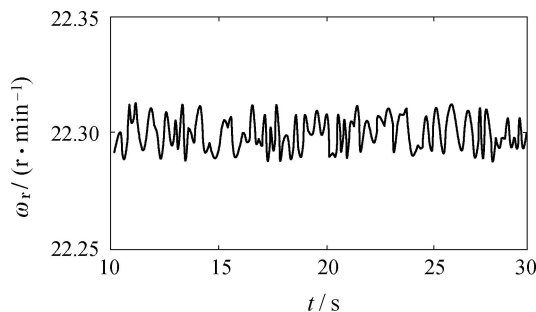
图 6 为模拟实际风速的仿真结果. 虽然输入风速大范围强烈波动(图 6(a)), 但风力机在非线性能率控制器的作用下, 通过调节桨距角跟随风速变化(图 6(b)), 可使风轮转速和发电机输出功率基本维持在额定值附近(图 6(c)和 6(d)), 从而较好地实现了风电机组的恒功率控制.



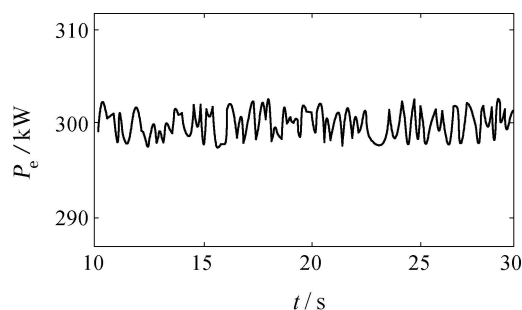
(a) 风速



(b) 桨距角



(c) 风轮转速



(d) 发电机输出功率

图 6 实际风速响应曲线

Fig. 6 Responses curves under actual wind speed

6 结语(Conclusions)

提出了变桨距风力发电机组微分几何反馈线性化恒功率控制器的设计方法, 将发电机的电磁转矩设置为额定值, 设计风力机桨距角非线性控制器, 额定风速以上时使风力机转速维持在额定值, 从而实现风力机的恒功率控制. 由于微分几何反馈线性化控制属于全局精确线性化, 所设计的恒功率控制器在风速大范围波动时仍具有满意的控制性能. 仿真结果证明了所提控制方法的有效性.

参考文献(References):

- [1] Global Wind Energy Council. Global wind report – annual market update 2011 [R]. Brussels Belgium: Global Wind Energy Council, 2012.
- [2] LEE T S. Input-output linearization and zero-dynamics control of three-phase AC/DC voltage-source converters [J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2003, 18(1): 11 – 22.
- [3] LIAO Z L, JIA H P, LIU G H, et al. Comparative study on vector control and differential geometry decoupling control method of induction motor [C] // *The 8th International Conference on Electrical Machines and Systems*. Piscataway, NJ: IEEE, 2005, (2): 1539 – 1543.

- [4] 黄松清. 电压型变频器、三相交流异步电动机传动系统的稳定性[J]. 控制理论与应用, 2005, 22(2): 223 – 228.
(HUANG Songqing. Stability for motor driver fed by voltage-type inverter [J]. *Control Theory & Applications*, 2005, 22(2): 223 – 228.)
- [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[J]. 中国电机工程学报, 1990, 10(s): 15 – 21.
(LU Qiang, SUN Yuanzhang, GAO Jingde. Development and application of geometric structure theory of nonlinear control system [J]. *Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering*, 1990, 10(S): 15 – 21)
- [6] 卢强, 梅生伟, 孙元章. 电力系统非线性控制[M]. 北京: 清华大学出版社, 2008.
(LU Qiang, MEI Shengwei, SUN Yuanzhang. *Nonlinear Control of Power System* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2008.)
- [7] 石峰, 查晓明. 应用微分几何理论的三相并联型有源电力滤波器解耦控制[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(15): 92 – 97.
(SHI Feng, ZHA Xiaoming. Decoupled control of the shunt three-phase active power filter applying differential geometry theory [J]. *Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering*, 2008, 28(15): 92 – 97)
- [8] 张亮, 孙玉坤. 基于微分几何的磁悬浮开关磁阻电机径向力的变结构控制[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(19): 121–126.
(ZHANG Liang, SUN Yukun. Variable-structure control of bearingless switched reluctance motors based on differential geometry [J]. *Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering*, 2006, 26(19): 121 – 126.)
- [9] 包能胜, 叶枝全. 水平轴失速型风力机主动非线性控制[J]. 太阳能学报, 2004, 25(4): 519 – 524.
(BAO Nengsheng, YE Zhiquan. Active nonlinear control of the stall horizontal wind turbine system [J]. *Acta Energiæ Solaris Sinica*, 2004, 25(4): 519 – 524.)
- [10] 包能胜, 姜桐. 微分几何在水平轴恒速风力发电机系统的应用[J]. 太阳能学报, 1999, 20(2): 130 – 134.
(BAO Nengsheng, JIANG Tong. Application of differential geometry in horizontal axis fixed speed wind turbine system [J]. *Acta Energiæ Solaris Sinica*, 1999, 20(2): 130 – 134.)
- [11] 陈思哲, 吴捷, 姚国兴, 等. 基于微分几何的风力发电机组恒功率控制[J]. 控制理论与应用, 2008, 25(2): 336 – 340.
(CHEN Sizhe, WU Jie, YAO Guoxing, et al. Power limitation control of wind turbine system based on differential geometry theory [J]. *Control Theory & Applications*, 2008, 25(2): 336 – 340.)
- [12] 包能胜, 姜桐, 陈庆新. 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[J]. 控制理论与应用, 1999, 16(5): 747 – 750.
(BAO Nengsheng, JIANG Tong, CHEN Qingxin. Nonlinear control of a variable speed WT system on ARWS – power limitation problem [J]. *Control Theory & Applications*, 1999, 16(5): 747 – 750.)
- [13] 王晓兰, 吴东佶. 基于微分几何方法的双馈发电机解耦控制[J]. 兰州理工大学学报, 2009, 35(1): 81 – 85.
(WANG Xiaolan, WU Dongji. Decoupling control of doubly-fed induction generator based on the differential geometry method [J]. *Journal of Lanzhou University of Technology*, 2009, 35(1): 81 – 85.)
- [14] KANNA O, HANBA S, YAMASHITA K. A method of damping transient rush voltage fluctuation of power systems due to a wind driven generator via nonlinear state feedback control [J]. *Electrical Engineering in Japan*, 1998, 124(1): 572 – 577.
- [15] BOUKHEZZAR B, SIGUERDIDJANE H, HAND M M. Nonlinear Control of variable-speed wind turbines for generator torque limiting and power optimization [J]. *Transactions of the ASME*, 2006, 128(11): 516 – 530.
- [16] 叶杭冶. 风力发电机组的控制技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006: 183 – 186.
(YE Hangye. *Control Techniques for Wind Energy Conversion System* [M]. Beijing: Machines Press, 2006: 183 – 186.)
- [17] SLOOTWEG J G, POLINDER H, KLING W L. Initialization of wind turbine models in power system dynamics simulations [C] // *IEEE Porto Power Tech Proceedings*. New York: IEEE, 2001, 4: 1 – 6.
- [18] BIANCHI F D, BATTISTA H D, MANTZ R J. *Wind Turbine Control Systems – Principle, Modelling and Gain Scheduling Design* [M]. London: Springer, 2007: 29 – 31.
- [19] JEAN-JACQUES E S. *Applied Nonlinear Control* [M]. Beijing: Machine Press, 2004: 246 – 248.
- [20] 胡跃明. 非线性控制系统理论与应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2001: 88 – 112.
(HU Yueming. *Theory and Application of Nonlinear Control System* [M]. Beijing: Defense Industry Press, 2001: 88 – 112.)

作者简介:

杨俊华 (1965–), 男, 博士, 教授, 研究方向为风力发电机组的设计与控制, E-mail: yly93@163.com;

郑俭华 (1985–), 女, 硕士, 研究方向为双馈电机的建模与控制, E-mail: zhengjianhuaabc@126.com;

杨梦丽 (1984–), 女, 助理工程师, 研究方向为电力系统的运行与控制, E-mail: 48780294@qq.com;

吴捷 (1937–), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事非线性控制、风力发电等方面的研究, E-mail: yly930@126.com.