

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2013.02.014

永磁风电机组全程高效风能获取非线性控制器设计

王冰^{1,2}, 张一鸣¹, 周建良¹

(1. 河海大学能源与电气学院, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学可再生能源发电技术教育部工程研究中心, 江苏 南京 211100)

摘要:针对永磁风电机组中存在的主要非线性环节(风能捕获功率的复杂非线性、发电机的典型非线性),设计风机转子角速度决策环节和非线性控制器,实现对风电机组的精确控制,达到全风速范围高效风能获取的目标。首先通过非线性观测器得到风速估计值,然后通过风能捕获功率的复杂非线性函数分析得到角速度参考值,最后利用角速度参考值与实际角速度值的差值驱动非线性控制器得到控制电压,以实现全程高效风能获取。针对风电机组模型,基于Lyapunov定理设计非线性控制器,能使实际角速度准确跟踪理想角速度的变化。仿真验证结果表明,非线性控制器的设计方法可行、有效。

关键词: 永磁风电机组;非线性控制器设计;Lyapunov定理;高效风能

中图分类号: TM614 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2013)02-0166-05

Nonlinear controller design of permanent magnet wind generators for obtaining high-efficiency wind energy for whole wind speed range

WANG Bing^{1,2}, ZHANG Yiming¹, ZHOU Jianliang¹

(1. College of Energy and Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;
2. Engineering Research Center of Renewable Power Generation Technologies, Ministry of Education, Hohai University, Nanjing 211100, China)

Abstract: Considering the main nonlinearities in the permanent magnet wind turbine, the complex nonlinear function of the power captured from wind and the typical nonlinear structure of generators, a speed decision-making module and a nonlinear controller were designed to control the wind turbine precisely and obtain high-efficiency wing energy for the whole wind speed range. First, a nonlinear observer was used to obtain the estimate of wind speed. Then, through analysis of the complex nonlinear function of the power captured from the wind, the reference value of angular speed was obtained. Finally, based on the difference between the reference value and the actual value, the nonlinear controller was driven to obtain the control voltage. Thus, the high-efficiency wind energy for the whole wind speed range was obtained. For the model of wind turbines, the nonlinear controller was designed based on the Lyapunov theorem. This control method can make the actual angular speed value follow the reference speed value precisely. The simulation results show that the proposed method for the design of the nonlinear controller is feasible and effective.

Key words: permanent magnet wind generators; nonlinear controller design; Lyapunov theorem; high-efficiency wind energy

开发和利用水能、风能、太阳能等可再生能源,改善能源结构已成为解决生存问题、保持社会可持续发展的战略选择^[1-2],因此深入分析和研究风力发电控制技术具有非常重要的意义^[3-5]。

永磁风电机组通过风机桨距角控制和发电机转矩控制获取最大能量,这是风电机组控制的主要目

收稿日期: 2012-11-01
基金项目: 国家自然科学基金(51007019)
作者简介: 王冰(1975—),男,江苏扬州人,副教授,博士,主要从事非线性控制、风力发电与新能源技术研究。E-mail: icekingking@hhu.edu.cn

标^[6-8]。当前,风电机组的控制方法主要有矢量控制和直接转矩控制^[9-12],这些控制方法一般很难满足精确控制的要求,而非线性控制策略能很好地解决这类问题。笔者提出一种新型非线性控制策略,将其应用于永磁风力发电系统,针对不同的风速情况进行转矩控制,以实现全风速范围内获取高效风能的目标。相比于以前的研究,笔者提出的非线性控制策略的主要特点在于:(a) 针对风能捕获功率的复杂非线性函数,采用分风速区域控制的方法分别获取期望角速度,为转矩非线性控制器设计提供参照;(b) 基于 Lyapunov 函数的非线性^[13],对风电机组进行转矩控制器设计,实现闭环系统渐近稳定;(c) 利用风速观测器^[14],根据角速度、电压、电流等数据获得风速值,提高了风速值的准确性。

1 风电机组运行模型

1.1 风电机组运行区域

风电机组的运行区域分为 4 个:区域 A,风能无法为风机提供足够的启动转矩;区域 B,实现最大功率点跟踪的目的;区域 C,保证输出功率的恒定;区域 D,为防止风机系统可能发生的损坏,强制风电机组脱网并停机。

1.2 风电机组模型

永磁风电机组通常由风机、变速箱、发电机组成。风机输出机械功率的数学模型为

$$p_w = 0.5 C_p \rho A v^3 \tag{1}$$

式中: p_w ——风机输出机械功率; ρ ——空气密度; A ——叶片旋转面积; v ——风速; C_p ——风能利用系数,为叶尖速比 λ 与叶片桨距角 β 的函数,可表示为 $C_p=f(\beta,\lambda)$,其中 $\lambda=\omega_r R/v$ 。

变速箱、发电机组数学模型为

$$\begin{cases} J_t \dot{\omega}_r = T_m - K_t \omega_r - n_g T_e \\ L_d \dot{i}_d = u_d - R_s i_d + L_q p \omega_g i_q \\ L_q \dot{i}_q = u_q - R_s i_q - L_d p \omega_g i_d - p \omega_g \psi \end{cases} \tag{2}$$

其中 $T_e = p(L_d - L_q)i_d i_q + p \psi i_q \quad J_t = J_r + n_g^2 J_g$

$$K_t = K_r + n_g^2 K_g \quad n_g = \frac{\omega_g}{\omega_r}$$

式中: ω_r ——风机转子角速度; ω_g ——发电机转子角速度; n_g ——变速箱变比; T_m ——传给风机的有效机械转矩; T_e ——施加于发电机转轴的电磁转矩; J_r ——风机转子的转动惯量; J_g ——发电机转子的转动惯量; K_r ——风机的摩擦系数; K_g ——发电机的摩擦系数; ψ ——永磁体磁链; p ——极对数; R_s ——定子电阻; L_d 、 L_q ——发电机 d 轴和 q 轴的电感; u_d 、 u_q 、 i_d 、 i_q ——发电机 d 轴和 q 轴的电压和电流。

为使永磁发电机损耗最小,通常假设 $i_d=0$,则 $T_e=p\psi i_q$,并有

$$L_q \dot{i}_q = u_q - R_s i_q - p \omega_g \psi \tag{3}$$

2 控制策略

转矩控制策略以额定风速为界可分为 2 个区间:区域 B 的控制目标为跟踪最大功率点,区域 C 的控制目标为保持额定输出功率,从而整个风电机组在全风速范围内能够从风能中获取高效能量。控制系统如图 1 所示。

2.1 非线性控制器

风电机组的转子角速度可通过调节 i_q 来控制。因为 i_q 与 T_e 有直接的比例关系,且式(2)表明 i_q 分量可以通过 u_q 分量来控制,所以在设计控制电压 u_q 使 ω_r 全程跟踪风机理想转速 ω_r^* 。

为设计非线性控制器,定义跟踪误差为 $e=\omega_r-\omega_r^*$,则

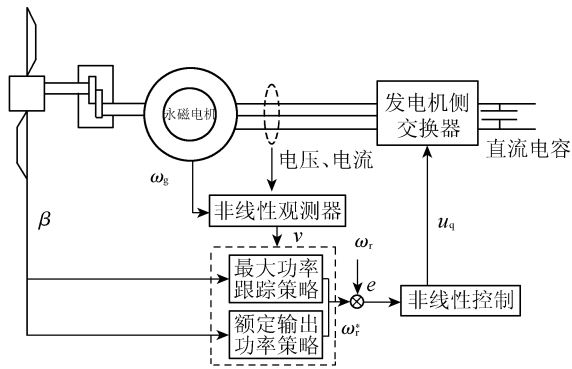


图 1 基于观测器的非线性控制策略

Fig. 1 Nonlinear control strategy based on observer

$$\dot{e} = \omega_r - \omega_r^* = \frac{1}{J_t}(\hat{T}_m - K_t \omega_r - n_g p \psi i_q) - \omega_r^* \tag{4}$$

设计控制方案需要使 e 趋近于 0, 令

$$\dot{e} = -K_0 e + Z_m \tag{5}$$

其中
$$Z_m = \frac{1}{J_t}(\hat{T}_m - K_t \omega_r - n_g p \psi i_q) + K_0 e - \omega_r^*$$

式中 $K_0 > 0$ 为设计常量, 当 $t \rightarrow \infty$ 时, $Z_m \rightarrow 0$, 则 $e \rightarrow 0$, 这是期望的效果。要使 $Z_m \rightarrow 0$, 首先取

$$\dot{Z}_m = \frac{1}{J_t}(\dot{\hat{T}}_m - K_t \dot{\omega}_r - n_g p \psi \dot{i}_q) + K_0 \dot{e} - \dot{\omega}_r^* \tag{6}$$

式中 $\hat{T}_m$ 和 ω_r^* 为已知估计值。将式(2)中 ω_r 、式(3)及式(5)代入式(6)得

$$\dot{Z}_m = F_m - b_m u_q \tag{7}$$

其中

$$\begin{aligned} F_m = & \frac{1}{J_t} \dot{\hat{T}}_m + \left(\frac{K_0}{J_t} - \frac{K_t}{J_t^2} \right) \hat{T}_m + \left(\frac{K_t^2}{J_t^2} - \frac{K_0 K_t}{J_t} + \frac{n_g^2 p^2 \psi^2}{J_t L_q} \right) \omega_r + \\ & \left(\frac{K_t n_g p \psi}{J_t^2} + \frac{n_g p \psi R_s}{J_t L_q} - \frac{K_0 n_g p \psi}{J_t} \right) i_q - K_0 \omega_r^* - \dot{\omega}_r^* \\ b_m = & \frac{n_g p \psi}{J_t L_q} \end{aligned}$$

设计控制器为

$$u_q = \frac{1}{b_m}(F_m + K_m Z_m) \tag{8}$$

式中 $K_m > 0$ 为设计常量, 将式(8)代入式(7)中得

$$\dot{Z}_m = -K_m Z_m \tag{9}$$

当 $t \rightarrow \infty$ 时, $Z_m \rightarrow 0$, 这为期望的效果, 且此时可通过控制 u_q 来调节 T_e , 进而调节 ω_r 。

定理 考虑永磁风电机组(式(2))在控制电压(式(8))的作用下, 可使 ω_r 渐近跟踪 ω_r^* 的变化, 其中 Z_m 由式(5)给出, F_m, b_m 由式(7)式给出。

证明 构造 Lyapunov 函数为 $V = \frac{1}{2}e^2 + \frac{1}{2}Z_m^2$, 求导得

$$\dot{V} = e\dot{e} + Z_m \dot{Z}_m \tag{10}$$

将式(5)、式(7)、式(8)代入式(10)得

$$\dot{V} = -K_0 \left(e - \frac{1}{2K_0} Z_m \right)^2 - \frac{4K_0 K_m - 1}{4K_0} Z_m^2 \tag{11}$$

因为 $K_0 > 0, K_m > 0$, 因此取 $K_0 K_m > 1/4$, 则得 $\dot{V} \leq 0$ 。

由 Lyapunov 稳定性定理可知, 系统是 Lyapunov 意义下稳定的, 即 ω_r 能跟踪 ω_r^* 变化。下文将进一步证明该系统是渐近稳定的。

设 $\dot{V} \equiv 0$, 则 $Z_m \equiv 0, e \equiv Z_m/2K_0$, 可得 $e = 0$ 。在不变集中, 只存在平衡点($e = 0, Z_m = 0$)。由 LaSalle 不变集定理可知, 该平衡点是系统的渐近稳定点, 即 ω_r 能渐近跟踪 ω_r^* 变化。至此, 完成证明。

2.2 非线性观测器

由上述非线性控制器设计过程可知: 驱动非线性控制器需要 2 个量: 作为参考角速度的 ω_r^* 和实测角速度 ω_r 。要得到 ω_r^* , 需要知道 v 。观测 v 的过程由 2 部分组成: 首先通过卡尔曼滤波器得到风机机械转矩的估计值 $\hat{T}_m$, 然后通过牛顿迭代法得出风速估计值 $\hat{v}$ ^[14]。

2.3 风机转子角速度决策模块

当风速小于额定风速时, $\beta = 0^\circ$, 保持最大风能吸收角度不变, 通过最大功率跟踪策略可得到 ω_r^* 。因为 $C_p = f(\lambda, \beta)$, 且 β 与 $v = \hat{v}$ 均为已知, 则 $C_p = f(\omega_r)$ 。因此, 根据 C_p 的最大值便可推出 ω_r^* 。

当风速大于额定风速时, 控制策略保持输出功率为额定功率。已知 $p_w = 0.5 C_p \rho A v^3, C_p = f(\lambda, \beta)$, 此时 β

为变量但可以测得, $v=\hat{v}$ 为已知,则 $p_w=f(\omega_r)$ 。由于发电机的输出功率 $p_e=\eta f(\omega_r)$ 保持在额定功率不变(η 为估计效率),因此风机输出机械功率 p_w 为常量,且可唯一确定转速 $\omega_r=\omega_r^*$ 。

3 仿 真

利用 MATLAB 软件检验提出的控制方法并评估系统的表现,风机系统的主要参数:桨叶半径为 6.50 m;变速箱变比为 20;发电机输出功率为 28 kW;风轮转动惯量为 620 kg/m²;额定风速为 15 m/s。

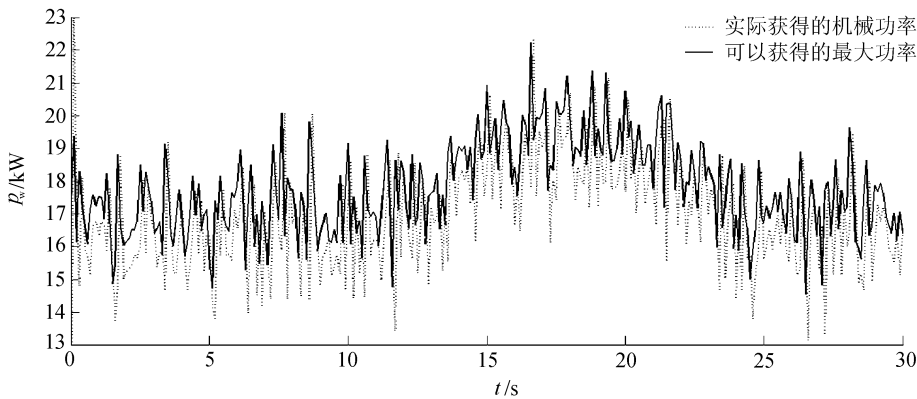


图 2 从风中获得的最大功率与实际获得的机械功率

Fig. 2 Maximum power from wind and mechanical power of wind turbine extracted from wind

风速在额定风速以下时,控制的主要目标为跟踪最大风能。由图 2 可知,风机很好地跟踪了风速变化且效率较高,可以说明用非线性控制方法来实现最大风能跟踪的效果良好,跟踪精度高。风速大于额定风速时,控制的主要目标为保持发电机的输出功率为额定功率。如图 3 所示,此时发电机的输出功率基本保持在额定功率附近,说明非线性方法控制效果良好。

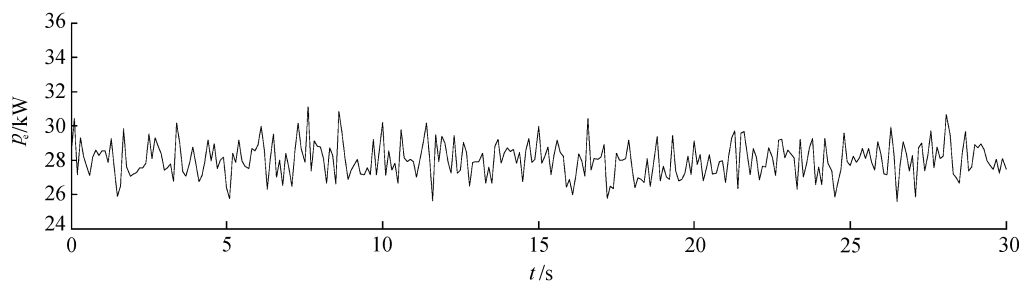


图 3 风速大于额定风速时的 p_e

Fig. 3 Generator output power above rated wind speed

4 结 语

利用基于 Lyapunov 函数的非线性控制方法对风电机组的控制器进行设计,使闭环系统达到渐近稳定。首先,根据角速度、电压、电流等观测数据设计风速观测器,得出风速估计值;然后,根据角速度决策模块得到理想角速度;最后,利用理想角速度与实际角速度的差值来驱动非线性控制器。应用 MATLAB 软件进行仿真,功率曲线说明了控制方法的可行性,即在额定风速以下时实现最大风能跟踪,在额定风速以上时保证发电机输出功率为额定功率,仿真结果表明新的控制方法有效、准确。未来可利用非线性方法对风电机组的桨距角和转矩进行协调控制,进一步提高风电机组的发电效率。

参考文献:

[1] 王承熙,张源. 风力发电[M]. 北京:中国电力出版社,2003.
[2] 刘万琨,张志英,李银凤. 风能与风力发电技术[M]. 北京:化学工业出版社,2006.
[3] 叶杭冶. 风电机组的控制技术[M]. 北京:机械工业出版社,2006.
[4] 徐大平,张新房,柳亦兵. 风力发电控制问题综述[J]. 中国电力,2005,38(4): 70-74. (XU Daping, ZHANG Xinfang, LIU

Yibing. Overview of relevant control problems of wind turbines[J]. Electric Power,2005,38(4):70-74. (in Chinese))

[5] 杨俊华,吴捷,杨金明. 现代控制在风能转换系统中的应用[J]. 太阳能学报,2004,25(4): 530-541. (YANG Junhua, WU Jie,YANG Jinming. Applications of modern control techniques in wind energy conversion system[J]. Acta Energiae Solaris Sinica,2004, 25(4):530-541. (in Chinese))

[6] 姚骏,廖勇,瞿兴鸿. 直驱永磁同步风力发电机的最佳风能跟踪控制[J]. 电网技术,2008,32(10): 11-15. (YAO Jun,LIAO Yong,QU Xinghong. Optimal wind-energy tracking control of direct-driven permanent magnet synchronous generators for wind turbines[J]. Power System Technology, 2008, 32(10):11-15. (in Chinese))

[7] CHINCHILL M, ARNALTES S, BURGOS J C. Control of permanent-magnet generators applied to variable-speed wind-energy systems connected to the grid[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2006, 17(6): 82-86.

[8] 阎耀民,范瑜,汪至中. 永磁同步电机风力发电系统的自寻优控制[J]. 电工技术学报,2002,17(6): 82-86. (YAN Yaomin, FAN Yu,WANG Zhizhong. Self-optimization control of PM synchronous wind turbine generator system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2002, 17(6):82-86. (in Chinese))

[9] 刘胜,戚磊,李冰. 永磁同步电机空间矢量控制方法设计实现[J]. 控制工程,2009,16(2):248-250. (LIU Sheng,QI Lei,LI Bing. Design and implement of space vector control of the permanent magnet synchronous motor[J]. Control Engineering of China, 2009,16(2):248-250. (in Chinese))

[10] 谭刚雷,郝润科,朱军. 双馈变速恒频风力发电系统矢量控制模型的研究[J]. 电气自动化,2010,32(4):66-70. (TAN Ganglei,HAO Runke,ZHU Jun. Study on vector control model of variable-speed constant-frequency double-fed wind power generation system[J]. Electrical Automation,2010,32(4):66-70. (in Chinese))

[11] 张凤阁,金石. 变速恒频无刷双馈风力发电机的直接转矩控制[J]. 太阳能学报,2012,33(3):420-424. (ZHANG Fengge, JIN Shi. Direct torque control for variable speed constant frequency brushless doubly-fed wind power generator[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2012,33(3):420-424. (in Chinese))

[12] 李燕. 双馈风力发电机直接转矩控制系统的研究[D]. 西安:西安理工大学,2010.

[13] KHALIL H K. 非线性系统[M]. 3 版. 朱义胜,董辉,李作洲,等,译. 北京:电子工业出版社,2011.

[14] ZHANG Jianzhong, CHENG Ming, CHEN Zhe. Nonlinear control for variable-speed wind tubines with permanent magent generators[C]//Proceedings of ICEMS2007. Seoul: Proceeding of International Conference on Electrical Machines and System, 2007:324-329.

· 简讯 ·

世界水日和中国水周

为唤起公众的水意识,建立一种更为全面的水资源可持续利用体制和相应的运行机制,1993 年 1 月 18 日第四十七届联合国大会根据联合国环境与发展大会制定的《21 世纪行动议程》中提出的建议,通过了第 193 号决议,确定自 1993 年起,将每年的 3 月 22 日定为“世界水日”,以推动对水资源进行综合性统筹规划和管理,加强水资源保护,解决日益严峻的缺水问题。同时,通过开展广泛的宣传教育活动,增强公众对开发和保护水资源的意识。

2013 年 3 月 22 日是第二十一届“世界水日”,3 月 22—28 日是第二十六届“中国水周”。联合国确定的 2013 年“世界水日”主题是“水合作”(water cooperation)。2013 年我国纪念“世界水日”和开展“中国水周”活动的宣传主题为“节约保护水资源,大力建设生态文明”。

(本刊编辑部供稿)