

文章编号:1671-251X(2013)08-0084-04 DOI:

王武. 永磁同步发电机风能转换系统滑模控制仿真[J]. 工矿自动化, 2013, 39(8): 84-87.

永磁同步发电机风能转换系统滑模控制仿真

王武

(许昌学院 电气信息工程学院, 河南 许昌 461000)

摘要:针对由于风速的随机波动性而使基于线性定常控制器的风能转换系统稳定性较差的问题,提出了一种基于滑模控制的永磁同步发电机风能转换系统的设计方案;分析了该系统中风力机模型、传动装置模型和永磁同步发电机模型的建立原理,介绍了滑模控制策略的具体实现。仿真结果表明,该系统具有较好的速度跟踪特性,实现了最大风能捕获。

关键词:永磁同步发电机; 风能转换; 滑模控制; 最大风能捕获; 速度跟踪

中图分类号:TD67 文献标志码:A 网络出版时间:

网络出版地址:

Simulation of sliding-mode control of wind energy conversion system of
permanent magnet synchronous generator

WANG Wu

(School of Electrical and Information Engineering, Xuchang University, Xuchang 461000, China)

Abstract: In view of problem of bad stability of wind energy conversion system based on linear constant controller caused by stochastic volatility of wind speed, the paper proposed a design scheme of wind energy conversion system of permanent magnet synchronous generator based on sliding-mode control. It analyzed building principle of model of wind turbine, model of driving device and model of permanent magnet synchronous generator in the system, and introduced implementation of sliding-mode control strategy. The simulation result shows that the system has good speed tracking characteristic to realize maximum wind energy capturing.

Key words: permanent magnet synchronous generator; wind energy conversion; sliding-mode control; maximum wind capturing; speed tracking

0 引言

在风能转换系统中,风速具有随机特性,且在时间和空间上都发生变化,同时,风力机桨叶具有空气动力学特性中的非线性、失速特性,发电机存在饱和效应,功率变换电路也具有非线性特征,风能质量难以达到能源系统所要求的电能质量和可靠性指标。传统线性定常控制器会引起超调,降低系统的稳定性^[1-2]。国内外对风能转换系统的研究热点是系统

优化设计和先进控制策略。参考文献[3]为了实现额定风速以下风能转换系统风能捕获率的最大化,根据风速的多时间尺度特性,基于频率分离原理建立了风能转换系统的双频环模型,并针对低频环和高频环分设优化控制器,实现了风能转换系统双频环滑模控制,实现了风能捕获率的最大化。参考文献[4]提出变桨距风电系统功率控制的逆系统鲁棒方法,可以在风速任意波动条件下有效地控制风电系统的输出功率,并且对系统参数的大范围扰动具

收稿日期:2013-05-08。

基金项目:河南省科技厅科技攻关计划资助项目(122102210416,112102210339)。

作者简介:王武(1978—),男,甘肃兰州人,讲师,硕士,主要从事电气自动化教学及控制理论与控制工程方面的研究工作, E-mail: xcu_wangwu@sina.com。

有较强的鲁棒性。参考文献[5]开发了基于无源性的双馈风力发电机控制系统,能够高速、有效实现最大风能捕获,同时对发电机参数摄动及负载转矩变化具有很强的鲁棒性。

滑模变结构控制是一类特殊的非线性控制,在动态过程中,根据系统当前的状态有目的地不断变化,迫使系统按照预定滑动模态进行运动,其设计与对象参数及扰动无关,对参数变化及扰动不灵敏,具有很强的鲁棒性,非常适于风能转换系统的控制^[6]。参考文献[7]将滑模变结构控制有效应用于无刷双馈风力发电机滑模功率解耦控制,实现了风能的最大功率捕获。参考文献[8]设计了模糊滑模控制器,实现了双馈异步风力发电机组的速度和桨距控制,有效减小了系统静态误差,弥补了非线性影响,鲁棒性较高。参考文献[9]将滑模控制与比例积分控制相结合,得到功率解耦控制策略,提高了动态响应和鲁棒性。参考文献[10]针对永磁同步风力发电直驱系统应用,采用滑模观测器无速度传感器控制算法观测角度和速度,实现了滑模控制速度、比例积分控制电流的组合控制,取得了较好的控制品质。

本文将充分考虑风能转换系统中的不确定性,实施等效控制加切换控制的滑模控制思想,以获取更好的控制品质。

1 永磁同步发电机风能转换系统建模

风能转换系统是可以将捕获的气流能量转换成电能的装置,由空气动力子系统、机械传动子系统、电磁子系统和电网界面4个部分构成。永磁同步发电机风能转换系统结构如图1所示。

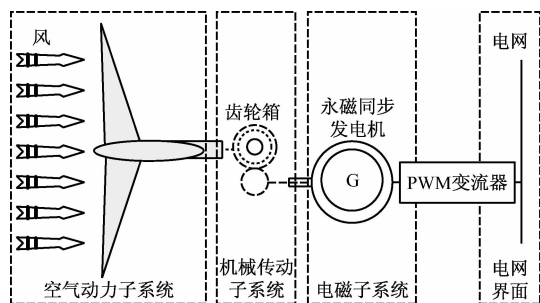


图1 永磁同步发电机风能转换系统结构

1.1 风力机模型

风力机的叶尖速度比表示叶片速度与风速之比^[11]:

$$\lambda = \frac{R\Omega_1}{v} \quad (1)$$

式中: R 为叶片长度; Ω_1 为风轮角速度; v 为风速。

功率系数 C_P 表示风力机的风能利用效率,风

力机的功率捕获公式为

$$P_{wt} = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 v^3 C_P(\lambda) \quad (2)$$

式中: ρ 为空气密度。

转矩系数 C_T 表征风轮输出转矩 Γ_{wt} ,其公式为

$$C_T = \frac{C_P(\lambda)}{\lambda} \quad (3)$$

1.2 传动装置模型

永磁同步发电机风力发电系统的刚性传动系统连接风轮和发电机,负责机械能的传递,其主要机械部件为增速齿轮^[12]。忽略黏性摩擦,其模型包含一个高速轴或低速轴提供的一阶运动方程,表示为

$$J_h \frac{d\Omega_h}{dt} = \frac{\eta}{i} \Gamma_{wt}(\Omega_1, v) - \Gamma_G(\Omega_h, c) \quad (4)$$

$$J_l \frac{d\Omega_l}{dt} = \Gamma_{wt}(\Omega_1, v) - \frac{i}{\eta} \Gamma_G(\Omega_h, c) \quad (5)$$

式中: Ω_h 为高速轴角速度; Ω_l 为低速轴角速度; η 为效率; i 为传动比; $\Gamma_{wt}(\Omega_1, v)$ 为空气动力转矩,以风速 v 为参数; $\Gamma_G(\Omega_h, c)$ 为电磁转矩,以表示的负荷变量为参数; J_h, J_l 分别为高速轴和低速轴的转动惯量,两者的表达式为

$$J_h = (J_1 + J_{wt}) \frac{\eta}{i^2} + J_2 + J_g \quad (6)$$

$$J_l = J_1 + J_{wt} + (J_2 + J_g) \frac{i^2}{\eta} \quad (7)$$

式中: J_1, J_2 为增速齿轮的转动惯量; J_{wt} 为风轮的转动惯量; J_g 为发电机的转动惯量。

1.3 永磁同步发电机模型

假设永磁同步发电机模型的定子绕组正弦分布、电磁对称,忽略铁损且磁路未饱和,则模型的表达式为

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}} = \begin{bmatrix} \frac{1}{L_d + L_s} [-R_s x_1 + p(L_d - L_s) x_2 \Omega_h] \\ \frac{1}{L_q + L_s} [-R_s x_2 - p(L_d + L_s) x_1 \Omega_h + p\Phi_m \Omega_g] \end{bmatrix} \mathbf{x} + \begin{bmatrix} -\frac{1}{L_d + L_s} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{L_q + L_s} \end{bmatrix} \mathbf{u} \\ \mathbf{y} = \Gamma_G = p\Phi_m x_2 \end{cases} \quad (8)$$

式中: $\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{u}$ 分别为状态变量、输出变量和输入变量, $\mathbf{x} = [x_1(t) \ x_2(t)]^T = [i_d(t) \ i_q(t)]^T$, $\mathbf{u} = [u_d \ u_q]$; $\dot{\mathbf{x}}$ 为状态的微分; L_s, L_d, L_q 分别为定子电感、 d 轴和 q 轴电感; R_s 为定子电阻; p 为发电机的极对数; Ω_g 为发电机的旋转角速度; Φ_m 为永磁决

定的恒值磁通。

2 滑模控制策略

假设永磁同步发电机风能转换系统的状态方程表示为^[13]

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{u}, t) \quad (9)$$

如果达到理想的滑动模态控制,则 $\dot{s} = 0$,即

$$\dot{s} = \frac{\partial s}{\partial \mathbf{x}} \frac{\partial \mathbf{x}}{\partial t} = 0 \text{ 或 } \frac{\partial s}{\partial \mathbf{x}} \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{u}, t) = 0 \quad (10)$$

则其解 u_{eq} 称为系统在滑动模态区的等效控制。

针对带有不确定性和外加干扰的系统,一般采用控制率为等效控制加切换控制,即

$$\mathbf{u} = \mathbf{u}_{eq} + \mathbf{u}_N \quad (11)$$

式中: u_N 为系统在滑动模态区的切换控制。

从高速轴的运动方程入手,选取 $\mathbf{x} = [\Omega_h \quad \Gamma_G]^T$ 为状态变量,则状态方程为^[14]

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}) + \mathbf{B}(\mathbf{x})\mathbf{u} \quad (12)$$

其中:

$$\mathbf{f}(\mathbf{x}) = [\Gamma_{wt}(i\Omega_h, v)/(J_h i) - \Gamma_G/J_h - \Gamma_G/T_G]^T \quad (13)$$

$$\mathbf{B}(\mathbf{x}) = [0 \quad 1/\Gamma_G]^T \quad (14)$$

式中: T_G 为电磁子系统的时间常数。

选取滑模面为

$$s = a_1 J_h \Omega_h + \Gamma_G(1 + a_2 J_h) - \Gamma_{wt}/i \quad (15)$$

式中:参数 a_1, a_2 对应滑模面上的一阶特性。

滑模控制的等效部分为

$$u_{eq} = \Gamma_G - \frac{\Gamma_G}{1 + a_2 J_h} (a_1 J_h \Omega_h + a_2 J_h \Gamma_G) [a_1 - A(\lambda, v)] \quad (16)$$

其中:

$$A(\lambda, v) = \frac{0.5\rho\pi R^4 v C'_p(\lambda)\lambda - C_p(\lambda)}{i^2 \lambda^2} \quad (17)$$

式中: $C'_p(\lambda)$ 是以 λ 为参数的功率系数的导数。

滑模控制的切换部分为

$$u_N = -\alpha \operatorname{sgn}_h(s) \quad (18)$$

式中: α 用以设置切换部分的幅值; $\operatorname{sgn}_h(s)$ 为宽度为 h 的滞后函数。

3 仿真分析

为了研究永磁同步发电机风能转换系统中滑模控制的最优控制性能,并简化系统分析和仿真计算,将系统中的功率元件和电网界面用常电感 L_s 和可变电阻 R_s 代替^[15],取 $L_s = 80 \text{ mH}$, $R_s = 80 \Omega$ 。风力机参数:空气密度 $\rho = 1.25 \text{ kg/m}^3$,风轮叶片长度 $R = 2.5 \text{ m}$,功率系数最大值 $C_p = 0.47$,叶尖速比最优值 $\lambda_{opt} = 7$ 。传动装置仿真参数:高速轴转动惯量 $J_h = 0.256 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$,低速轴转动惯量 $J_l = 4.2 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$,传动比 $i = 7$,传动效率 $\eta = 0.95$ 。永磁同步发电机系统参数:发电机极对数 $p = 3$,定子额定电压 $U_s = 380 \text{ V}$, $R_s = 3.3 \Omega$, $L_d = L_q = 41.52 \text{ mH}$, $\Phi_m = 0.4352 \text{ Wb}$ 。

在 Matlab 环境下进行仿真,仿真时间设定为 100 s ,仿真结果如图 2—图 7 所示,从中可看出, 8 s 后,基于滑模控制的永磁同步发电机风能转换系统在设定的最优叶尖速比 $\lambda_{opt} = 7$ 附近振荡,跟踪性能良好;能够收敛于设定值 $C_p = 0.47$ 。

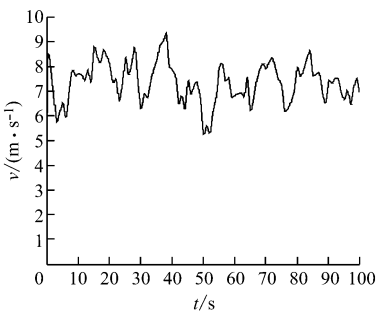


图 2 风速变化曲线

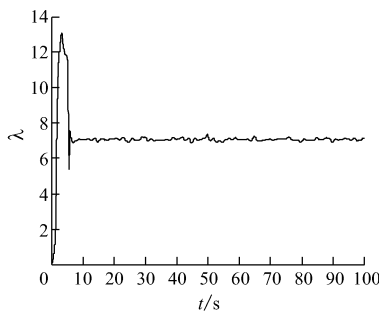


图 3 叶尖速比曲线

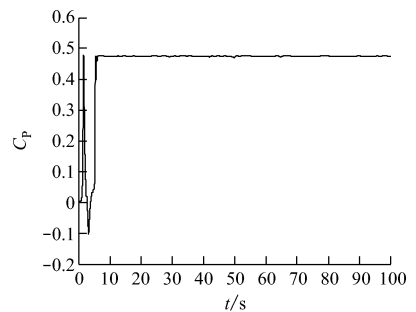


图 4 功率系数曲线

4 结语

实现了永磁同步发电机风能转换系统的建模,构建的风能转换系统由空气动力子系统、机械传动子系统、电磁子系统和电网界面 4 个子系统构成,探

讨了各个子系统的数学模型,充分考虑风能转换系统中的不确定性,将等效控制加切换控制的滑模控制思想应用于该系统。仿真结果表明,该系统能够快速跟踪随机风速变化,实现了最大风能捕获。今后将进一步考虑风电系统中变流器的模型,从而建

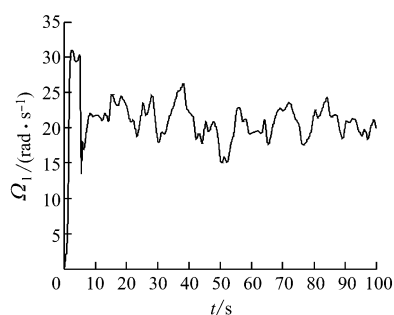


图5 低速轴角速度曲线

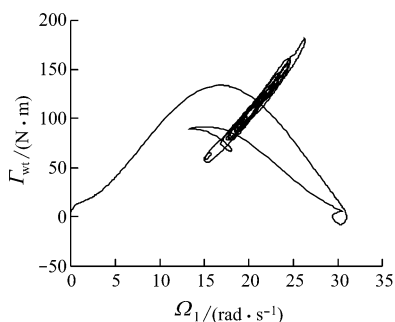


图6 转矩控制特性曲线

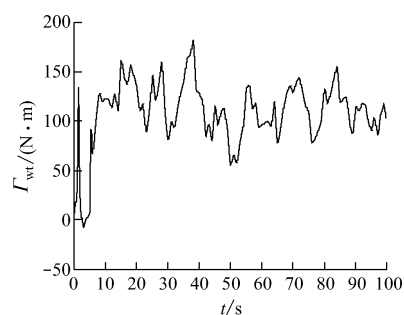


图7 输出转矩曲线

立起风电系统更为全面和真实的统一数学模型,实现控制策略的应用,切实提高风电转换效率。

参考文献:

- [1] BIANCHI F D, DE BATTISTE H, MANTZ R J. Wind turbine control systems [M]. London: Springer, 2007: 60-160.
- [2] MUNTEANU I, BRARCU A I, CUTULULIS N A, et al. Optimal control of wind energy systems [M]. London: Springer, 2008: 40-80.
- [3] 孟涛, 纪志成. 风能转换系统双频环滑模控制[J]. 电机与控制学报, 2009, 13(增刊 1): 152-156.
- [4] 耿华, 周伟孙, 杨耕. 变桨距风电系统功率控制的逆系统鲁棒方法[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2010, 50(5): 718-723.
- [5] 高勇, 张文娟, 杨媛, 等. 基于无源性的变速恒频双馈风力发电机控制系统[J]. 电工技术学报, 2010, 25(7): 130-136.
- [6] 王武, 白政民, 姚宁. 永磁直线同步电机神经滑模控制仿真[J]. 电机与控制应用, 2011, 38(2): 22-25.
- [7] 张先勇, 吴捷, 杨俊华, 等. 无刷双馈风力发电机滑模功率解耦控制[J]. 太阳能学报, 2007, 28(1): 68-13.

- [8] 孔屹刚, 王志新. 大型风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(5): 136-141.
- [9] 陈旻, 侯勇. 滑模控制在双馈风力发电机功率解耦控制中的应用[J]. 中国电力, 2008(7): 73-77.
- [10] 张志刚, 张桂香. 永磁同步风力发电系统滑模变结构矢量组合控制[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2011, 42(7): 167-172.
- [11] 惠晶, 杨元侃, 顾鑫. 变速恒频无刷双馈风力发电机的功率控制系统[J]. 电机与控制应用, 2008, 35(7): 27-30.
- [12] 潘庭龙, 周先明. 基于 Vissim 的 DFIG 风力发电系统建模与仿真[J]. 微特电机, 2010, 38(11): 39-42.
- [13] 王武, 王红玲, 葛瑜. 电液位置伺服系统神经滑模控制仿真[J]. 机械设计与制造, 2011(4): 113-114.
- [14] 刘金琨. 滑模变结构控制 MATLAB 仿真[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005: 136-378.
- [15] 朱必刚, 纪志成. 基于永磁同步风力发电系统的自抗扰控制[J]. 江南大学学报: 自然科学版, 2011, 8(4): 385-390.