130

#### Electric Power Automation Equipment

## 基于 Lyapunov 函数的直驱式风力发电机的 无速度传感器直接功率控制

史旺旺1.刘超2

(1. 扬州大学 能源与动力工程学院,江苏 扬州 225009;

2. 扬州大学 江苏省水利动力工程重点实验室 江苏 扬州 225009)

摘要:针对直驱式风力发电机无速度传感器中滑模辨识的感应电势产生高频脉动的缺点,采用近似滑模控制 对电机的正弦波感应电势进行辨识.并采用直接功率控制模型进行功率控制。由于直接功率控制模型中只存 在角频率,降低了相位跟踪过程中控制器的设计难度,提高了系统转速的响应速度。采用 Lyapunov 函数对角 速度进行辨识,保证了系统稳定,取消了数字锁相环,实现更加简单。仿真结果表明,所提控制模型及方法能 准确控制电机功率,提高了电机响应速度。

关键词:永磁同步发电机;直驱风电系统;无速度传感器控制; Lyapunov 函数;控制;风电;同步发电机 中图分类号: TM 315: TM 762 文献标识码: A DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2013.01.025

#### 引言 0

目前直驱式风力发电省去了故障率较高的变 速齿轮箱,提高了系统可靠性,同时可以提高发电 机效率、降低成本和噪声、节省成本印。因此永磁直 驱风力发电系统是变速恒频风力机的重要发展方 向之一。

永磁同步电机(PMSG)无速度传感器控制中速 度和相位的辨识方法主要有模型参考辨识法、神经 网络辨识法和滑模变结构辨识法[1-7]。文献[7]对上 述3种方法进行了对比仿真研究,并得出滑模变结 构方法具有更好的鲁棒性的结论。文献[1-3.5.7-8] 采用假定旋转坐标法结合数字锁相环研究了无速度 传感器控制,并利用"电气稳态"概念[9]在确定锁相 误差时忽略了 dq 坐标系中电流微分项,该方法在接 近稳态时效果较好,但忽略了暂态过程的数据,响应 速度会降低。由于滑模变结构控制抗干扰能力强, 基于电流和磁链模型的滑模变结构控制方法或自 适应滑模辨识研究较多[7,10-13],也有文献用神经网络 和模糊等方法提高辨识精度[12]。但滑模变结构辨识 中感应电势谐波成分增加,容易造成系统抖动,常用 滤波方法来消除,但这会增加延时。

本文采用滑模控制方法控制模型电流,使模型 电流误差为零,并使用具有过渡带的近似符号函数, 即近似滑模控制,得到了近似正弦波感应电势。由 于电机瞬时功率对电机电势、电流、速度和相位不 敏感,基于直接功率控制模型利用 Lyapunov 法进行 功率控制,同时辨识出电机角频率,保证了系统稳定,

收稿日期:2011-10-16;修回日期:2012-10-09 基金项目:江苏省重点实验室开放课题(05318733431);江苏省 科技支撑计划(BE2010699)

Project supported by Open Project of Key Laboratory of Jiangsu Province (05318733431) and Science and Technology Support Program of Jiangsu Province (BE2010699)

减小了相位跟踪过程中控制器设计难度,提高了电 机对转速的响应速度。本文感应电势辨识采用 DO 坐标系模型,而功率控制采用直接功率控制模型,并 对所提控制策略进行了仿真验证。

#### PMSG 的滑模观测器模型

采用电动机惯例,面装式 PMSG 在 DQ 坐标系下 的定子电压方程为:

$$\frac{\mathrm{d}i_{D}}{\mathrm{d}t} = Fu_{D} - Fe_{D} - F_{r}i_{D}$$

$$\frac{\mathrm{d}i_{Q}}{\mathrm{d}t} = Fu_{Q} - Fe_{Q} - F_{r}i_{Q}$$
(1)

$$\begin{cases} e_D = -\omega_r \Psi_f \sin \theta_r \\ e_O = \omega_r \Psi_f \cos \theta_r \end{cases}$$
 (2)

其中, $u_D$ 、 $u_O$  分别为变流器输出电压的 D、Q 轴分 量; $i_D$ , $i_O$ 分别为定子电流的D,Q轴分量;F=1/L, $F_r=$ R/L,L 为发电机定子等效电感,R 为发电机定子电 阻; $e_D$ , $e_O$ 分别为发电机D,Q轴感应电势; $\omega$ ,为转子 电角速度: $\Psi$ : 为转子磁链: $\theta$ : 为转子电角度。

参考模型的方程为:

$$\begin{cases} \frac{\mathrm{d}\,\hat{i}_D}{\mathrm{d}t} = Fu_D - Fu_1 - F_r\,\hat{i}_D \\ \frac{\mathrm{d}\,\hat{i}_Q}{\mathrm{d}t} = Fu_Q - Fu_2 - F_r\,\hat{i}_Q \end{cases} \tag{3}$$

其中, $\hat{i}_{D}$ 、 $\hat{i}_{O}$  为模型电机定子电流的 D、Q 轴分量, $u_{1}$ 、 u,为模型电机控制电压。

将式(1)和式(3)相减,如果两式中电机参数一 致,则得:

$$\frac{\mathrm{d}\,\tilde{i}_{D}}{\mathrm{d}\,t} = -F(e_{D} - u_{1}) - F_{r}\,\tilde{i}_{D}$$

$$\frac{\mathrm{d}\,\tilde{i}_{Q}}{\mathrm{d}\,t} = -F(e_{Q} - u_{2}) - F_{r}\,\tilde{i}_{Q}$$
(4)

其中, $\tilde{i}_D = i_D - \hat{i}_D$ 、 $\tilde{i}_Q = i_Q - \hat{i}_Q$ 为观测误差。

取 Lyapunov 函数为:

$$V_1 = \frac{1}{2} \tilde{i}_D^2 + \frac{1}{2} \tilde{i}_Q^2 \tag{5}$$

对式(5)求导,得:

$$\dot{V}_{1} = \tilde{i}_{D} \dot{\tilde{i}}_{D} + \tilde{i}_{Q} \dot{\tilde{i}}_{Q} = -F \tilde{i}_{D} [(e_{D} - u_{1}) - F_{r} \tilde{i}_{D}] - F \tilde{i}_{Q} [(e_{Q} - u_{2}) - F_{r} \tilde{i}_{Q}]$$

$$(6)$$

若令

$$\begin{cases} u_1 = F_r \tilde{i}_D - k \operatorname{sgn}(\tilde{i}_D) \\ u_2 = F_r \tilde{i}_O - k \operatorname{sgn}(\tilde{i}_O) \end{cases}$$
 (7)

且满足  $k > \max(|e_D|, |e_Q|), 则有 \dot{V}_1 < 0,$  动态观测误差方程渐近稳定。由于符号函数引起的控制为不连续控制率,为使它连续可导,用一连续可导的函数近似,即:

$$[g(s)]_{ad} = \frac{1 - \exp(-us)}{1 + \exp(-us)}$$
(8)

当  $u \to \infty$  时, $[g(s)]_{sd} \to \operatorname{sgn}(s)$ 。符号函数中 k 的选择应大于电机最大转速时的感应电势的幅值,但在低速时容易产生波动。为此 k 应根据转速变化自动调整,调整公式为:

$$k = k_{\rm a} + k_{\rm b} \omega_{\rm r} \Psi_{\rm f} \tag{9}$$

其中, $\omega_r$ 为辨识角频率, $k_a$ 为主要考虑在动态辨识初期  $\omega_r$ 较小时保证系统稳定所加的基值, $k_b$ 为考虑辨识误差所加的大于1的系数。

当式(4)中的 $\tilde{i}_D$ 、 $\tilde{i}_Q$  收敛到 0 时,可得  $u_1=u_D$  和  $u_2=u_Q$ ,由此可辨识出感应电势。

#### 2 直接功率控制模型

采用上述滑模辨识可以得到  $e_D$ 、 $e_Q$  的近似值,采用近似符号函数后,可以做到辨识结果近似为正弦波,而且响应速度很快。这样可以利用式(3)进行 $u_D$ 、 $u_Q$  设计。但设计时无论采用 DQ 坐标系或 dq 坐标系,都需要电机感应电势的角频率和相位值,对它们的识别一般利用锁相环进行,响应时间比较长,使得在暂态过程中给定值出现误差,对控制不利,甚至出现控制信号频率不能跟踪感应电势频率的情况。控制信号的频率和相位误差影响了电机电流的频率,进而影响了感应电势的辨识。瞬时功率模型对电压电流相位不敏感,该模型只用到角频率,降低了设计难度,同时响应速度更快。

根据瞬时功率的定义,令

$$\begin{cases}
p = u_1 i_D + u_2 i_Q \\
q = u_1 i_O - u_2 i_D
\end{cases}$$
(10)

对式(10)中 $_p$ 、 $_q$  求导,同时考虑到电网电压三相对称时满足:  $\frac{\mathrm{d}u_1}{\mathrm{d}t} = -\omega u_2$  和  $\frac{\mathrm{d}u_2}{\mathrm{d}t} = \omega u_1$ , $\omega$  为电网

电压角频率。得到功率控制方程为:

$$\begin{cases} \frac{\mathrm{d}p}{\mathrm{d}t} = F(u_1 u_D + u_2 u_Q) - F(u_1^2 + u_2^2) - F_r p + \omega q \\ \frac{\mathrm{d}q}{\mathrm{d}t} = F(u_1 u_Q - u_2 u_D) - F_r q - \omega p \end{cases}$$
(11)

在三相对称条件下,PMSG 功率模型与坐标系无关。令  $u_p = u_1 u_D + u_2 u_Q$ ,  $u_q = u_1 u_Q - u_2 u_D$ 。将  $u_p$ ,  $u_q$  看作控制量,在求出  $u_p$ ,  $u_q$  后,利用其定义可求出控制量  $u_D$  和  $u_Q$ ,即:

$$\begin{cases} u_D = \frac{u_p u_1 - u_q u_2}{u_1^2 + u_2^2} \\ u_Q = \frac{u_p u_2 + u_q u_1}{u_1^2 + u_2^2} \end{cases}$$
(12)

由于  $u_p$ 、 $u_q$  为直流量,式(11)直接利用了  $u_1$ 、 $u_2$ ,因此控制量  $u_p$ 、 $u_0$  与感应电势同频率。

### 3 基于 Lyapunov 法的控制器设计

功率控制的目标是p 跟踪设定值 $p_0,q$  跟踪设定值 $q_0$ ,设 $p-p_0=s_1,q-q_0=s_2,\omega-\hat{\omega}=\tilde{\omega},\hat{\omega}$  为角频率 $\omega$  的观测值 $\tilde{\omega}$  为观测误差。为使功率控制和 $\omega$  观测误差为0,定义如下 Lyapunov 函数:

$$V_{2} = \frac{1}{2} s_{1}^{2} + \frac{1}{2} C_{1} \left( \int_{0}^{t} s_{1} d\tau \right)^{2} + \frac{1}{2} s_{2}^{2} + \frac{1}{2} C_{2} \left( \int_{0}^{t} s_{2} d\tau \right)^{2} + k_{\omega} \widetilde{\omega}^{2}$$
(13)

其中 $,s_1,s_2$ 为有功功率和无功功率控制误差 $;C_1,C_2$ 为 $s_1,s_2$ 的积分项的加权系数 $,k_\omega$ 为观测误差的加权系数,分别表示在Lyapunov函数中所占的权重。

对 Lyapunov 函数  $V_2$  求导,将  $\omega = \hat{\omega} + \hat{\omega}$  代入式 (11)得:

$$\dot{V}_{2} = s_{1} \left[ F u_{p} - F (u_{1}^{2} + u_{2}^{2}) - F_{r} p + \hat{\omega} q + C_{1} \int_{0}^{t} (p - p_{0}) d\tau \right] +$$

$$s_{2} \left[ F u_{q} - F_{r} q - \hat{\omega} p + C_{2} \int_{0}^{t} q d\tau \right] +$$

$$\vdots$$

$$\tilde{\omega} q s_{1} - \tilde{\omega} p s_{2} - k_{\omega} \tilde{\omega} \hat{\omega}$$

$$(14)$$

为使  $\dot{V}_2 \leq 0$ ,令  $\tilde{\omega} q s_1 - \tilde{\omega} p s_2 - k_{\omega} \hat{\omega} \hat{\omega} = 0$ ,则得  $\hat{\omega}$  的自适应率为.

$$\hat{\omega} = (qs_1 - ps_2) / k_{\omega} \tag{15}$$

同时令

$$\begin{vmatrix} u_{p} = \left[ -k_{p} s_{1} + F(u_{1}^{2} + u_{2}^{2}) + F_{r} p - \omega q - C_{1} \int_{0}^{t} s_{1} d\tau \right] / F \\ u_{q} = \left( -k_{q} s_{2} + F_{r} q - \omega q - C_{2} \int_{0}^{t} s_{2} d\tau \right) / F \end{vmatrix}$$
(16)

其中 $,k_v,k_a$ 为有功功率和无功功率控制的比例系数。

则  $\dot{V}_2 = -k_p s_1^2 - k_q s_2^2 \le 0$ , 由 Lyapunov 定理知系统收敛。

#### 4 仿真验证及分析

为验证本文所提出的直接功率模型以及控制算法的有效性,使用 MATLAB 进行仿真,仿真时电机电阻  $R=0.6~\Omega$ ,电感  $L=5~\mathrm{mH}$ ,则 F=200, $F_r=120$ 。为测试对转速的响应能力,仿真时在  $0.1~\mathrm{s}$  时将感应电势频率从  $50~\mathrm{Hz}$  降为  $20~\mathrm{Hz}$ 。图  $1~\mathrm{为实际电势和近似滑模辨识的电势。从图中可以看出两曲线基本重合.说明辨识效果良好。$ 

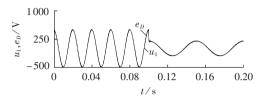


图 1 电机实际与辨识感应电势 Fig.1 Practical and identified induced electromotive force of PMSG

图 2 为在辨识出的电势的基础上利用直接功率 控制模型设计的控制电压,结果说明控制电压能跟 踪电势频率的变化。图 3 为电机 D 轴电流。

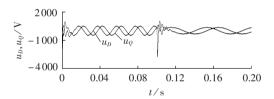


图 2 控制电压 Fig.2 Control voltage

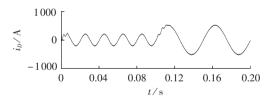


图 3 电机电流 Fig.3 Current of PMSG

图 4 为  $p_0$  = -100 kW、 $q_0$  = 0 kvar 的电机输出功率,由于本文采用电动机惯例,功率的设定值取负值,表示电机发出的功率。由图 4 可以看出,在 Lyapunov采用功率误差积分后,输出功率无误差,且响应速度很快。

图 5 为采用角频率自适应率的频率输出。可以 看出能以较快的速度跟踪频率的突变,但在 50 Hz

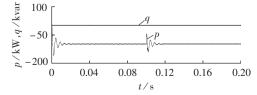


图 4 电机功率输出 Fig.4 Power output of PMSG

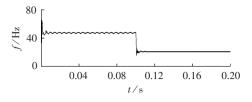


图 5 观测频率 Fig.5 Identified frequency

时有一定的误差,表明该自适应率不适用于角频率测量,但用在基于 Lyapunov 函数设计时是有效的,可以保证系统收敛。

#### 5 结语

直驱式风力发电中 PMSG 的电机转速变化大, 在无速度传感器控制中对相位辨识要求高,对控制 提出了更高的要求。本文在滑模辨识基础上采用近 似滑模控制对电机感应电势进行辨识,获得了近似 正弦波感应电势。利用直接功率控制模型进行功率 控制,降低了相位跟踪过程中控制器的设计难度,提 高了电机对转速的响应速度。对于直接功率控制中 需要的角频率,利用 Lyapunov 函数给出角频率的自 适应率,取消了数字锁相环,提高了控制响应速度。 仿真结果表明,本文采用的基于 Lyapunov 函数的功 率控制和角频率自适应方法,可以快速地对电机功率 进行控制,较适用于直驱式风力发电中 PMSG 控制, 如功率控制和最大功率跟踪等。但本文提出的方法 需要精确的电机模型,如果在控制中对电机参数进行 辨识,则效果会更好。

#### 参考文献:

- [1] 胡书举,王剑飞,赵栋利,等. 无速度传感器控制永磁直驱风电变流器的研制[J]. 电机与控制学报,2009,13(1):67-72.
  - HU Shuju, WANG Jianfei, ZHAO Dongli, et al. Development on sensorless control based back-to-back converter for direct-driven WECS using PMSG[J]. Electric Machines and Control, 2009, 13 (1):67-72.
- [2] 薛花,王育飞. 基于无源性的同步电机自适应滑模控制方法[J]. 电力自动化设备,2011,31(7):67-71.
  - XUE Hua, WANG Yufei. Passivity-based adaptive sliding mode control for synchronous motors [J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(7):67-71.
- [3] 王剑飞,胡书举. 永磁直驱型风力发电机的无传感器控制研究[J]. 电力电子技术,2009,43(3):6-7.
  - WANG Jianfei, HU Shuju. Sensorless control of PMSG in direct-drive wind power system[J]. Power Electronics, 2009, 43(3);6-7.
- [4] 付勋波,张雷,胡书举,等. 模型参考自适应无速度传感器技术在 永磁直驱风力发电系统中应用[J]. 电力自动化设备,2009,29(9): 90-93.
  - FU Xunbo, ZHANG Lei, HU Shuju, et al. Application of MRAS speed-sensor-less technology to direct drive wind power system [J]. Electric Power Automation Equipment, 2009, 29(9):90-93.
- [5] 章国宝,魏自聪,祖晖,等. 基于定子阻值辨识的直驱风电系统无



- 速度传感器技术[J]. 电力自动化设备,2012,32(3):94-98. ZHANG Guobao,WEI Zicong,ZU Hui,et al. Speed-sensorless control based on stator resistance estimation for direct-driven
- control based on stator resistance estimation for direct-driven wind power system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012,32(3):94-98.
- [6] JEMAA B,LOTFI K,OUALI A. A comparative study between three sensorless control strategies for PMSG in wind energy conversion system[J]. Applied Energy, 2009, 86(9):1565-1573.
- [7] DIAZ S A, SILVA C, JULIET J, et al. Indirect sensorless speed control of a PMSG for wind application [C]//IEEE International Electric Machines and Drives Conference, 2009. IEMDC'09. Miami, FL, USA; [s.n.], 2009; 1844-1850.
- [8] ORLANDO N A, LISERRE M, MONOPOLI V G. Speed sensorless control of a PMSG for small wind turbine systems [C] // IEEE International Symposium on Industrial Electronics, 2009. ISIE 2009. Seoul, Korea: [s.n.], 2009:1540-1545.
- [9] 王成元,夏加宽,杨俊友,等. 电机现代控制技术[M]. 北京:机械工业出版社,2008;245-249.
- [10] MALIK E,LI C S. Sliding mode observer for wide-speed sensorless control of PMSM drives[C]//Conference Record of

- the Industry Applications Conference, 2003. 38th IAS Annual Meeting. Salt Lake City, USA: [s.n.], 2003: 480-485.
- [11] EVGEN U, KAREL J. Speed sensorless variable structure control of PMSM[C]//IECON 2006-32nd Annual Conference on IEEE Industrial Electronics. Paris, France: [s.n.], 2006:1194-1199.
- [12] SINGH M, CHANDRA A. Application of adaptive network-based fuzzy inference system for sensorless control of PMSG-based wind turbine with nonlinear-load-compensation capabilities [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2011, 26(1):165-175.
- [13] SONG C,XU L. Position sensorless control of PMSM based on a novel sliding mode observer over wide speed range[C] // CES/IEEE 5th International Power Electronics and Motion Control Conference, 2006. IPEMC 2006. Shanghai, China: [s.n.], 2006:1-7.

#### 作者简介:

史旺旺(1969-),男,江苏溧水人,硕士,研究方向为光伏和风力发电控制(E-mail; yzdxsww@163.com);

刘 超(1949-),男,江苏扬州人,博士,研究方向为水利 水电工程。

# Sensorless direct power control based on Lyapunov function for direct-driven wind power system

SHI Wangwang<sup>1</sup>, LIU Chao<sup>2</sup>

(1. School of Energy and Power Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225009, China;

2. Hydrodynamic Engineering Laboratory of Jiangsu Province,

Yangzhou University, Yangzhou 225009, China)

Abstract: As the induced electromotive force of SMO(Sliding Mode Observer) in sensorless PMSG(Permanent Magnet Synchronous Generator) control of direct-driven wind power system produces high frequency pulses, it is proposed to apply approximate SMO in the sine wave identification of induced electromotive force and to adopt the direct power control model in power control. Since there is only angular frequency, the controller design used in phase tracking is simplified and the response of system speed is enhanced. The angular speed is recognized with Lyapunov function to ensure the system stability and no PLL is used to simplify the implementation. Simulative results show that the proposed control model controls the power of PMSG accurately and improves the response speed of PMSG.

**Key words**: PMSG; direct-driven wind power system; speed sensorless control; Lyapunov function; control; wind power; synchronous generators