

基于定子磁链的双馈风力发电机滑模 MRAS 转速估计

王庆龙^{1,2}, 汪增福¹, 杨淑英³, 谢震³, 张兴³

(1. 中国科学技术大学信息科学技术学院, 安徽合肥 230027; 2. 合肥学院电子信息与电气工程系, 安徽合肥 230601;
3. 合肥工业大学 电气与自动化工程学院, 安徽合肥 230009)

摘要:针对双馈风力发电机工作环境恶劣,使用机械传感器进行速度和位置信号检测导致的故障率高、检修不便等问题,提出了一种基于双馈电机定子磁链的滑模 MRAS 转速估计器。方法是利用双馈电机定子磁链电压模型作为参考模型,利用双馈电机定子磁链电流模型作为自适应模型,利用两模型输出的叉积构造滑模面,并利用小信号模型分析了滑模存在和到达条件。同时,通过引入连续的饱和函数,解决了传统滑模观测器的高频抖动问题。最后,基于 Matlab/SimuLink 对提出的控制方法性能进行了验证。

关键词:双馈风力发电机;滑模 MRAS;无速度传感器;转速估计;定子磁链

中图分类号: TM315 **文献标识码:** A doi:10.3969/j.issn.0253-2778.2014.07.010

引用格式: Wang Qinglong, Wang Zengfu, Yang Shuying, et al. Stator-flux-based sliding-mode MRAS speed estimation of doubly-fed wind power generator[J]. Journal of University of Science and Technology of China, 2014,44(7):605-611.

王庆龙,汪增福,杨淑英,等. 基于定子磁链的双馈风力发电机滑模 MRAS 转速估计[J]. 中国科学技术大学学报,2014,44(7):605-611.

Stator-flux-based sliding-mode MRAS speed estimation of doubly-fed wind power generator

WANG Qinglong^{1,2}, WANG Zengfu¹, YANG Shuying³, XIE Zhen³, ZHANG Xing³

(1. School of Information Science and technology, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China;
2. Department of Electronics and Electrical Engineering, Hefei University, Hefei 230601, China;
3. Department of Electronics and Electrical Engineering, Hefei University, Hefei 230009, China)

Abstract: Under the execrable operating environment, the mechanical sensor for detecting the position and speed signals of the doubly-fed wind power generator leads to more faults and inconvenient maintenance. To solve the problem, a stator flux-based sliding-mode model reference adaptive system (MRAS) speed estimator was proposed. In the proposed sliding-mode MRAS estimator, the stator flux voltage model of the doubly-fed wind power generator was used to obtain the reference model and its current model as the adaptive model, and a slide-mode surface was designed according to the two model output cross product, and the reaching conditions for the sliding mode were analyzed by using the small-signal model. Meanwhile the continuous saturation function is introduced to overcome the high frequency chattering problem. And the

收稿日期:2014-01-17;修回日期:2014-04-17

基金项目:国家自然科学基金(51107025),安徽省教育厅自然科学基金重点项目(KJ2014A213)资助。

作者简介:王庆龙,男,1968年生,博士/副教授。研究方向:控制科学与工程、风力发电技术等。E-mail: wqlong@ustc.edu.cn

performances of the proposed control method were tested in Matlab/SimuLink.

Key words: doubly-fed wind power generator; sliding-mode MRAS; speed-sensorless; speed estimation; stator flux

0 引言

随着大规模风电场的规划和建设,风力发电在电力系统中的比重逐步增加^[1-2].目前,风力发电主流技术是变速恒频发电,双馈电机(doubly-fed induction generator, DFIG)以其独特的变流驱动结构成为 MW 级风力发电机的主流机型,占据着当前风力发电的主导地位^[3-4].目前商业化 DFIG 风电机组的变流驱动主要是通过对 DFIG 转子励磁变流器采用电网电压或磁场定向的矢量控制方法实现的^[5-6].无论采用哪种定向方法,其关键是转子位置/速度的信息获取,进而实现转子电流有功分量和无功分量的解耦^[7].对于实际工程中的 DFIG 来说,编码器与变流器及其控制装置之间距离约为 50~100 m,使得编码器的输出信号容易受到干扰;风电场通常位于沿海、沙漠等偏远地区,高温、高湿等恶劣环境容易影响编码器的精度;编码器安装于塔筒顶端,增加了维护工作的难度;以上问题的存在大大降低了风力发电系统的可靠性^[8-9],因此,无速度传感器矢量控制技术成为双馈风力发电领域的研究热点^[10].

文献[11-22]介绍了 DFIG 无速度传感器控制技术一些研究成果,总的来说可被分成开环和闭环两种方案.开环的位置观测方案无论采用电压积分进行磁链估计^[11],还是基于反三角函数的实时计算^[12],抑或采用迭代方法^[13-14],因缺乏自校正能力,使得估计结果受电机参数等因素影响较大.闭环方案如模型参考自适应系统(model reference adaptive system, MRAS),其参考模型需要理想积分器,驱动自适应机制的调节信号通常为定、转子的电流或磁通,采用 PI 控制算法获得位置/速度信息^[15-19],但实际的积分器存在积分漂移,严重地影响了位置估计的精度.其他闭环方法如自适应降阶/全阶观测器^[20-21]和锁相环(phase-locked loop, PLL)^[22],前者的主要问题在于确定的各种负载条件下选取最优增益比较困难,状态的初始条件也影响观测器的收敛性;后者的观测精度严重依赖于电机参数.

滑模观测器本质上是一类特殊的非线性控制,

将其用于感应电机的无速度传感器控制系统,提高了磁链和转速的鲁棒性和观测精度,有效地减小了转矩脉动,扩展了调速范围,提高了调速性能^[23].对于实际风力发电系统,并网发电时要求具有一定风速,从而使得风力发电机无速度传感器控制最难实现的低速估算问题得以解决,因此将这种方法移植到双馈风力发电机的位置估计中,比其在电动机上的应用更有优势.

本文结合双馈风力发电系统的特点,提出了一种基于定子磁链的滑模 MRAS 转速估计方案,实现了无速度传感器双馈风力发电机矢量控制策略.通过引入连续的饱和函数,解决了传统滑模观测器不连续的砰-砰控制产生的高频抖动问题.仿真实验验证了该控制策略的正确性和可靠性.

1 双馈风力发电机的矢量控制方法

关于双馈风力发电机的矢量控制文献很多,这里仅作以简述.假设双馈电机采用电动机惯例,可得同步旋转 dq 坐标系下的双馈电机数学模型:

$$\left. \begin{aligned} u_s &= R_s i_s + p\psi_s + j\omega_s \psi_s \\ u_r &= R_r i_r + p\psi_r + j\omega_d \psi_r \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

定、转子磁链方程为:

$$\left. \begin{aligned} \psi_s &= L_s i_s + L_m i_r \\ \psi_r &= L_m i_s + L_r i_r \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中, u_s , u_r 分别为定、转子端电压矢量; i_s , i_r 分别为定、转子电流矢量; ψ_s , ψ_r 分别为定、转子磁链矢量; L_m , L_s , L_r 分别为定、转子间互感和自感; R_s , R_r 分别为定、转子电阻; ω_s 为同步角频率; ω_d 为转差角频率 ($\omega_d = s\omega_s$, s 为转差率); p 为微分算子.

定义广义励磁电流 i_{ms} 满足:

$$\psi_s = L_m i_{ms} \quad (3)$$

则有:

$$i_s = \frac{L_m}{L_s} (i_{ms} - i_r) \quad (4)$$

$$\psi_r = \frac{L_m^2}{L_s} i_{ms} + \sigma L_r i_r \quad (5)$$

式中, σ 为电机漏磁系数,且 $\sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_r L_s}$.

综合考虑式(1),(3)和(5),得

$$\left. \begin{aligned} u_s &= R_s i_s + L_m \frac{di_{ms}}{dt} + j\omega_s \psi_s \\ u_r &= R_r i_r + \sigma L_r \frac{di_r}{dt} + \frac{L_m^2}{L_s} \frac{di_{ms}}{dt} + j\omega_s \psi_r \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

式(6)可作为双馈风力发电矢量控制的依据. 当采用定子磁链定向时, 双馈风力发电机的定子有功功率与无功功率实现解耦控制, 即控制转子电流的 q 轴分量就可以控制定子有功功率, 控制转子电流的 d 轴分量就可以控制定子无功功率. 无速度传感器双馈电机定子磁链定向的矢量控制系统如图 1 所示.

图 1 所示仅为电流环. 图中, i_{rd}^*, i_{rq}^* 分别为转子 d, q 轴电流参考指令; i_{rd}, i_{rq} 为转子 d, q 轴电流反馈值; u_{rd}^*, u_{rq}^* 为转子 d, q 轴电压参考指令; $u_{\alpha}^*, u_{\beta}^*$ 为转子 α, β 轴电压参考指令; $u_{ra}^*, u_{rb}^*, u_{rc}^*$ 为三相静止坐标系中转子电压参考指令; $i_{sa}, i_{sb}, i_{sa}, i_{sb}$ 分别为定、转子电流测量值; u_{sab}, u_{sbc} 为定子线电压测量值; ψ_{sd} 为定子 d 轴磁链; 用于坐标变换的转差角度计算如下:

$$\theta_d = \theta_s - \hat{\theta}_r \quad (7)$$

式中, 定子磁链矢量位置角度 θ_s 通过下式获取,

$$\theta_s = \tan^{-1} \left(\frac{\psi_{s\beta}}{\psi_{s\alpha}} \right) \quad (8)$$

转子位置电气角度 $\hat{\theta}_r$ 通过本文提出的滑模 MRAS 估计器获得.

定子磁链的 α, β 分量由定子电压、电流通过下式获得:

$$\left. \begin{aligned} \psi_{s\alpha} &= \int (u_{s\alpha} - R_s i_{s\alpha}) dt \\ \psi_{s\beta} &= \int (u_{s\beta} - R_s i_{s\beta}) dt \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

式中, $i_{s\alpha}, i_{s\beta}$ 为二相静止坐标系 α, β 定子电流的分量; $u_{s\alpha}, u_{s\beta}$ 为二相静止坐标系 α, β 定子电压分量.

式(9)中积分的积累误差会形成直流分量, 影响磁链计算结果, 为此用一阶惯性环节代替积分运算以抑制直流分量^[19], 表达如下:

$$\left. \begin{aligned} \psi_{s\alpha} &= \frac{u_{s\alpha} - R_s i_{s\alpha}}{K_p s + 1} \\ \psi_{s\beta} &= \frac{u_{s\beta} - R_s i_{s\beta}}{K_p s + 1} \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

式中, K_p 为抑制直流分量引入的参数.

2 基于定子磁链的滑模 MRAS 转速估计

2.1 基本原理

基于定子磁链的滑模 MRAS (sliding-mode MRAS, SM-MRAS) 估计转速的原理如图 2 所示.

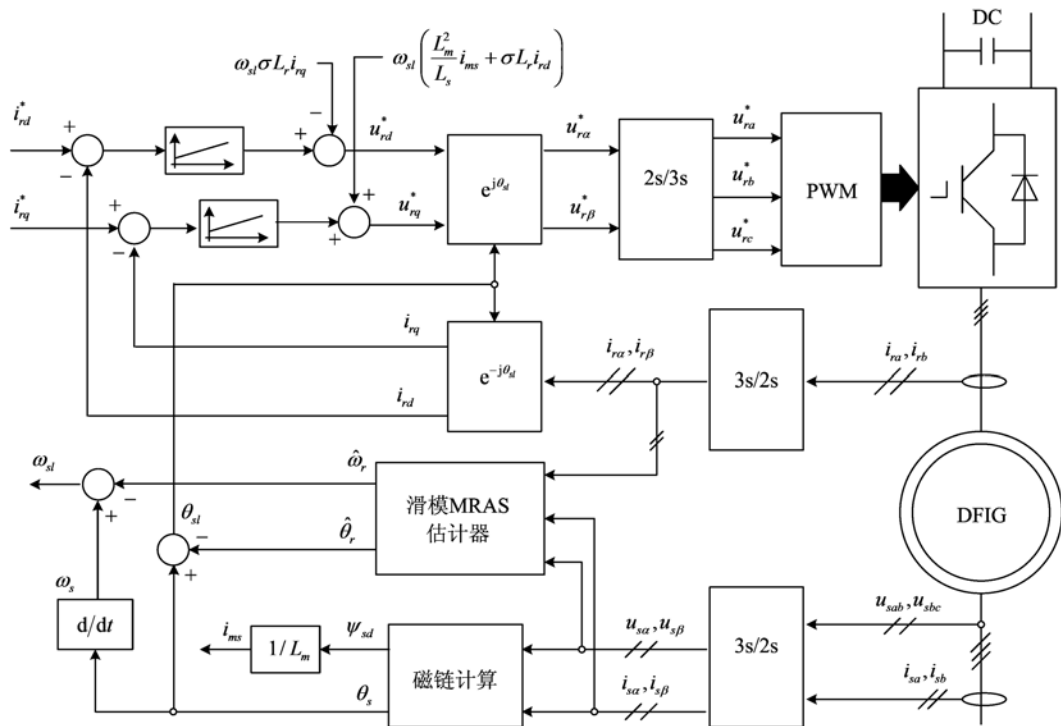


图 1 双馈电机无速度传感器矢量控制
Fig. 1 Sensorless vector control of DFIG

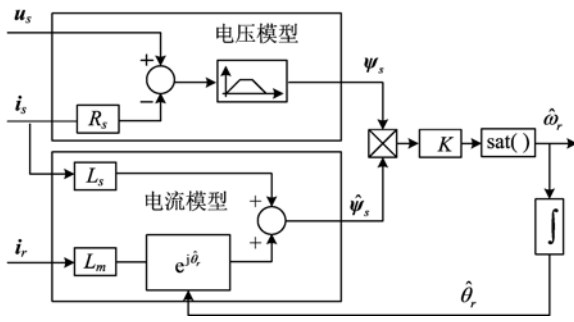


图 2 滑模-MRAS 估计器原理

Fig. 2 Principle of SM-MRAS speed estimation

图 2 中,参考模型是不含有速度信息的双馈风力发电机定子磁链电压模型,可调模型是含有待估计转速信息的双馈风力发电机定子磁链电流模型,滑模面由两个模型输出的定子参考与估计磁链的叉积构成,通过滑模算法获得双馈风力发电机的转速,并进行积分运算进而获得转子电气角度用以调节可调模型的参数及参与双馈电机的矢量变换,使得实际风力发电系统的速度能够追踪参考速度,即满足:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} e_p(t) = 0 \quad (11)$$

式中, $e_p(t) = \hat{\psi}_s(t) - \psi_s(t)$, $e_p(t_0) = \hat{\psi}_s(t_0) - \psi_s(t_0) = 0$.

重写定子磁链电压模型式(10)如下:

$$\psi_s = (u_s - R_s i_s) / (K_p s + 1) \quad (12)$$

式中, u_s , i_s , ψ_s 分别代表两相静止坐标系中定子电压、电流、磁链矢量。

根据包含转速信息的定子磁链电流模型可构造参数可调的估计模型如下:

$$\hat{\psi}_s = L_s i_s + L_m i_r e^{j\hat{\omega}_r t} \quad (13)$$

式中, $\hat{\psi}_s$ 为两相静止坐标系中定子磁链矢量的估计值, $\hat{\omega}_r$ 为转子电气角速度的辨识值。

2.2 SM-MRAS 转速估计器的设计

构造如下切换函数:

$$s = e \quad (14)$$

式中, e 为参考模型与自适应模型的相对误差矢量:

$$e = \psi_s \otimes \hat{\psi}_s \quad (15)$$

考虑同步旋转 d - q 坐标系,则式(15)可化为:

$$e = \hat{\psi}_{sd} \psi_{sq} - \psi_{sd} \hat{\psi}_{sq} \quad (16)$$

式中, $\hat{\psi}_{sd}$, $\hat{\psi}_{sq}$ 分别为定子 d , q 轴磁链估计值。

传统的滑模开关信号会产生高频抖振,本文选用连续的饱和函数取代开关函数以消除滑模控制中的高频抖振。考虑其低频分量,可得:

$$\hat{\omega}_r = K \cdot \text{sat}(s) \quad (17)$$

式中,饱和函数 $\text{sat}(s) = \begin{cases} 1 & s > A \\ s/A & |s| \leq A \\ -1 & s < -A \end{cases}$; K 为一个

大于零的常数; A 为阈值。

滑动模态存在和到达条件分析。由式(16)可得偏差的小信号模型如下:

$$\Delta e = \psi_{sq0} \Delta \hat{\psi}_{sd} - \psi_{sd0} \Delta \hat{\psi}_{sq} + \hat{\psi}_{sd0} \Delta \psi_{sq} - \hat{\psi}_{sq0} \Delta \psi_{sd} \quad (18)$$

式中, ψ_{sd0} , ψ_{sq0} , $\hat{\psi}_{sd0}$, $\hat{\psi}_{sq0}$ 分别为稳态工作点定子 d , q 轴参考磁链及估计磁链; $\Delta \psi_{sd0}$, $\Delta \psi_{sq0}$, $\Delta \hat{\psi}_{sd0}$, $\Delta \hat{\psi}_{sq0}$ 分别为稳态工作点定子 d , q 轴参考磁链及估计磁链的增量。

当采用定子磁链定向时,则在稳态工作点存在:

$$\psi_{sq0} = \hat{\psi}_{sq0} = 0, \Delta \psi_{sq} = 0 \quad (19)$$

因此,式(16)可简化为:

$$\Delta e = -\psi_{sd0} \Delta \hat{\psi}_{sq} \quad (20)$$

根据两相静止坐标系中式(13)定子磁链的估计模型,可得同步旋转 d - q 坐标系中定子磁链的估计模型为:

$$\hat{\psi}_{sdq} = L_s i_{sdq} + L_m i_{rdq} e^{j(\hat{\omega}_r - \omega_r)t} \quad (21)$$

式中, $\hat{\psi}_{sdq}$ 为 d - q 坐标系中定子磁链矢量的估计值; i_{sdq} , i_{rdq} 分别为 d - q 坐标系中定、转子电流量矢量。该式表明,只有估计转速等于实际转速,电流模型中定子磁链的 d , q 分量才是直流信号。

令:

$$\theta_e = (\hat{\omega}_r - \omega_r)t \quad (22)$$

则由式(21)可得:

$$\left. \begin{aligned} \hat{\psi}_{sd} &= L_s i_{sd} + L_m i_{rd} \cos \theta_e - L_m i_{rq} \sin \theta_e \\ \hat{\psi}_{sq} &= L_s i_{sq} + L_m i_{rd} \sin \theta_e + L_m i_{rq} \cos \theta_e \end{aligned} \right\} \quad (23)$$

假设在稳态工作点存在 $\theta_{e0} = 0$, $\omega_{r0} = \hat{\omega}_{r0}$, 则可得:

$$\Delta \hat{\psi}_{sq} = \Delta \theta_e \left[\frac{\partial \hat{\psi}_{sq}}{\partial \theta_e} \right]_{\theta_{e0}} = L_m i_{rd0} \Delta \theta_e \quad (24)$$

式中, i_{rd0} 为稳态工作点转子 d 轴电流。将式(24)代入式(20),可得:

$$\Delta e = -L_m i_{rd0} \psi_{sd0} \Delta \theta_e \quad (25)$$

对切换函数 s 求导,并考虑式(14)~(16), (22), (25), 得到:

$$\dot{S} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta e}{\Delta t} = \omega_r (L_m i_{rd0} \psi_{sd0}) - K (L_m i_{rd0} \psi_{sd0}) \text{sat}(S) \quad (26)$$

由于 $(L_m i_{rd0} \psi_{sd0}) > 0$ 且存在上限,式(26)表明,一定存在充分大的常数 K ,使得滑模面满足如下

条件:

$$S\dot{S} < 0 \tag{27}$$

如果系统进入滑动模态控制, 则 $\dot{S}=0$. 考虑式 (26), 可得等效转速 ω_{eq} 表达式如下:

$$\omega_{eq} = \hat{\omega}_r \tag{28}$$

式(28)表明, 在稳态工作点当估算磁链收敛于参考磁链时, 等效速度收敛于真实速度.

3 仿真分析

根据上述双馈风力发电机矢量控制原理及转速估计器设计, 基于 Matlab/SimuLink7.1 搭建了仿真实验平台, 进行了双馈风力发电机运行工况仿真实验. 双馈风力发电机参数: 电机额定功率 3.0 kW, 定子额定电压 380 V, 定子额定电流 6.9 A, 定子绕组电阻 $R_s=0.433 \Omega$, 转子绕组电阻 $R_r=0.86 \Omega$, 定子自感 $L_s=0.07131 \text{ H}$, 转子自感 $L_r=0.07131 \text{ H}$, $L_m=0.0693 \text{ H}$, 极对数 $n_p=2$.

图 3 为双馈风力发电机运行于亚同步速时仿真波形. 其中, 图 3(a)为速度参考值和速度估计值波

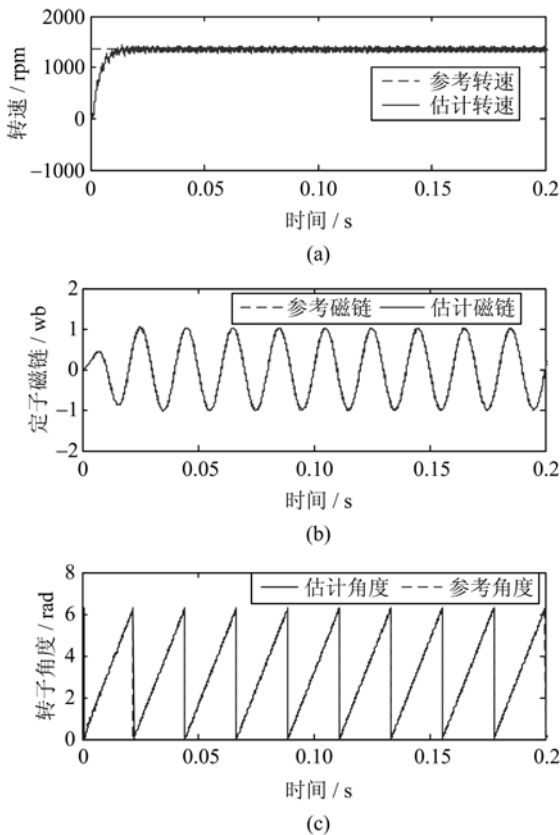


图 3 双馈电机亚同步运行时仿真波形
Fig. 3 Simulation curves of DFIG operation under sub-synchronism

形, 表明稳态时转速跟踪精度高、动态时转速响应快; 图 3(b)为定子磁链 α 分量的实测与辨识波形, 表明在一个工频周期内即可实现匹配; 图 3(c)为转子电气角位置的实测与估计波形, 表明在一个工频周期内即可实现跟踪.

图 4 为双馈风力发电机穿越同步速时的仿真结果. 由图 4(a)可知, 0.5 s 时风力发电机转速由 1 350 rpm 开始上升并穿越同步转速, 稳定运行在 1 650 rpm 一段时间后再开始下降并穿越同步转速, 最后稳定运行于 1 350 rpm, 图 4(b)、图 4(c)为相应的转差角度和转子三相电流分量. 结果表明, 双馈电机能够获得较好的同步频率穿越特性.

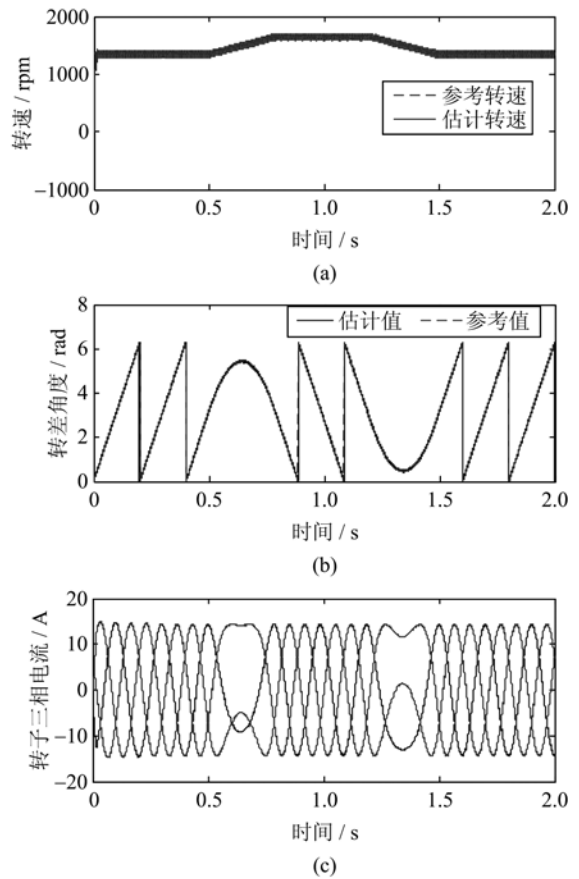


图 4 双馈电机穿越同步转速时仿真结果
Fig. 4 Simulation Results of DFIG passing through synchronism

图 5 为双馈电机并网发电运行时的波形. 图 5(a)为参考转速和估计转速波形, 图 5(b)为转子电流的有功、无功分量, 图 5(c)为定子电流波形. 由图 5(a)、5(b)可知, 0.6 s 时风力发电机并网且转子电流有功分量发生阶跃变化时, 估计转速产生了波动, 经历过短暂的动态过程之后, 估计转速依然能够很

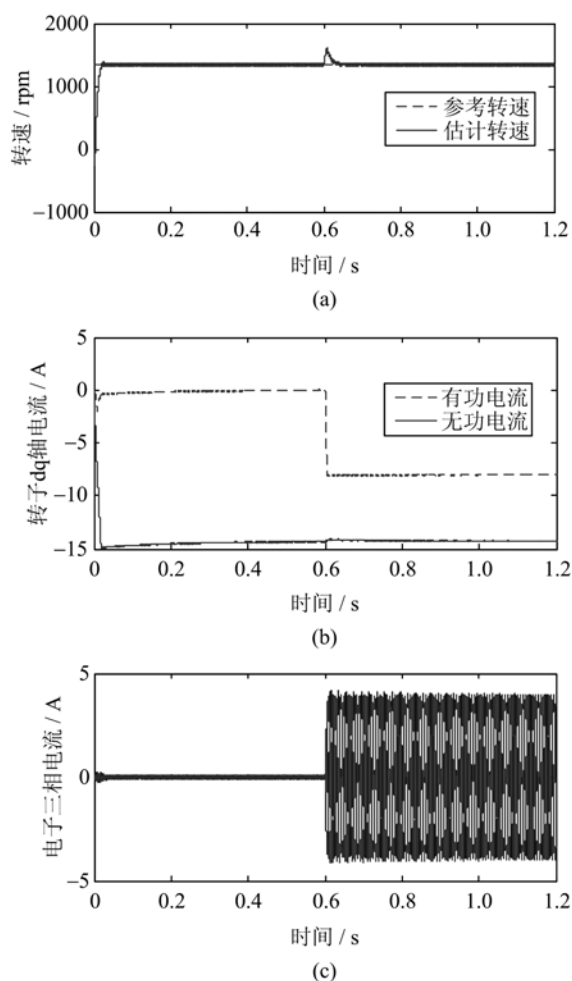


图 5 双馈电机并网发电运行时的波形

Fig. 5 Waveforms of DFIG grid-connection operation

好地跟踪给定转速. 表明所提出的转速估计方法具有较好的扰动抑制能力.

4 结论

本文提出的滑模 MRAS 速度估计方法中, 参考模型为双馈风力发电机定子磁链电压模型, 可调模型为双馈风力发电机定子磁链电流模型, 利用两模型的输出构造了滑模面, 并利用小信号模型分析了滑模存在和到达条件; 为解决传统滑模观测器存在高频抖动问题引入饱和函数. 本策略在风力发电机运行于亚同步速、穿越同步速及并网发电等情况下的仿真研究表明:

(I) 系统动态、稳态性能良好, 速度及位置辨识精度较高;

(II) 对负载扰动具有较强的鲁棒性;

(III) 估计器结构简单, 易于工程实现.

参考文献 (References)

- [1] Chowdhury B H, Chellapilla S. Double-fed induction generator control for variable speed wind power generation[J]. *Electric Power System Research*, 2006, 76(9): 786-800.
- [2] Li H, Fu B, Yang C, et al. Reactive current allocation and control strategies improvement of low voltage ride-through for doubly fed induction wind turbine generation system [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2012, 32(22): 24-31.
李辉, 付博, 杨超, 等. 双馈风电机组低电压穿越的无功电流分配及控制策略改进[J]. *中国电机工程学报*, 2012, 32(22): 24-31.
- [3] Ramtharan G, Ekanayake J B, Jenkins N. Frequency support from doubly fed induction generator wind turbines[J]. *IET Renewable Power Generation*, 2007, 1(1): 3-9.
- [4] Chondrogiannis S, Barnes M. Stability of doubly-fed induction generator under stator voltage orientated vector control[J]. *IET Renewable Power Generation*, 2008, 2(3): 170-180.
- [5] Hu J B, He Y K, Wang H S, et al Proportional resonant current control scheme for rotor-side converter of doubly-fed induction generators under unbalanced network voltage conditions[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2010, 30(6): 48-56.
胡家兵, 贺益康, 王宏胜, 等. 不平衡电网电压下双馈感应发电机转子侧变换器的比例-谐振电流控制策略[J]. *中国电机工程学报*, 2010, 30(6): 48-56.
- [6] Petersson A, Harnefors L, Thiringer T. Comparison between stator flux and grid flux oriented rotor current control of doubly-fed induction generators[C]// 35th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference. Aachen, Germany: IEEE Press, 2004: 482-486.
- [7] Mohseni M, Islam S M, Masoum M A S. Enhanced hysteresis-based current regulators in vector control of DFIG wind turbines[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2011, 26(1): 223-234.
- [8] 战亮宇. 双馈风力发电系统变流器控制的相关研究[D]. 北京交通大学, 2012.
- [9] Yang S Y, Zhang X, Zhang C W, et al. Speed and position observer of DFIG based on rotor current vector angle deviation [J]. *Automation of Electric Power System*, 2009, 33(4): 92-95.
杨淑英, 张兴, 张崇巍, 等. 基于转子电流偏差角的双馈感应电机速度观测[J]. *电力系统自动化*, 2009, 33(4): 92-95.
- [10] Chen G F, Huang S D, Huang K Y, et al. Experimental

- evaluation of observation for doubly-fed induction wind power generator[J]. *ACTA Energiæ Solaris Sinica*, 2011, 32(2): 189-192.
- 陈国富, 黄守道, 黄科元, 等. 双馈感应风力发电机位置观测的实验评估[J]. *太阳能学报*, 2011, 32(2): 189-192.
- [11] Hopfensperger B, Atkinson D J, Lakin R A. Stator flux oriented control of a doubly-fed induction machine with and without position encoder[J]. *IEE Proceedings of the Electric Power Applications*, 2000, 147(4): 241-250.
- [12] Huang S, Liao W, Huang K Y. Speed sensorless control of doubly-fed wind generator system [J]. *Electric Drive*, 2010, 40(3): 3-5.
- 黄晟, 廖武, 黄科元. 双馈风力发电系统无速度传感器控制[J]. *电气传动*, 2010, 40(3): 3-5.
- [13] Abolhassani M, Enjeti P, Toliyat H. Integrated doubly fed electric alternator/active filter (IDEA), a viable power quality solution, for wind energy conversion systems[J]. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2008, 23(2): 642-650.
- [14] Jain A K, Ranganathan V T. Wound rotor induction generator with sensorless control and integrated active filter for feeding nonlinear loads in a stand-alone grid [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2008, 55(1): 218-228.
- [15] Cárdenas R, Peña R, Proboste J, Asher G, Clare J. MRAS observer for sensorless control of standalone doubly fed induction generators[J]. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2005, 20(4): 710-718.
- [16] Cárdenas R, Peña R, Proboste J, Asher G, Clare J. Sensorless control of a doubly-fed induction generator for stand alone operation [C]// 35th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference. Aachen, Germany: IEEE Press, 2004: 3 378-3 383.
- [17] Peña R, Cárdenas R, Proboste J, et al. Sensorless control of doubly-fed induction generators using a rotor-current-based MRAS observer [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2008, 55(1): 330-339.
- [18] Cárdenas R, Peña R, Clare J C, et al. MRAS observers for sensorless control of doubly-fed induction generators [J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2008, 23(3): 1 075-1 084.
- [19] 高乐. 双馈感应风力发电机控制系统关键技术研究 [D]. 湖南大学, 2010.
- [20] Yang S, Ajarapu V. A speed-adaptive reduced-order observer for sensorless vector control of doubly fed induction generator-based variable speed wind turbines [J]. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2010, 25(3): 891-900.
- [21] Yang S, Ajarapu V. Sensorless Control of the doubly-fed induction generator for wind energy generations using a speed-adaptive full-order flux observer [C]// 24th Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition. Washington, USA: IEEE Press, 2009: 1 951-1 957.
- [22] Mwinyiwiwa B, Zhang Y, Shen B, et al. Rotor position phase-locked loop for decoupled P-Q control of DFIG for wind power generation [J]. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2009, 24(3): 758-765.
- [23] Wang Q L, Zhang C W, Zhang X. Variable structure MRAS speed identification for speed sensorless vector control of induction motor [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2007, 27(15): 70-74.
- 王庆龙, 张崇巍, 张兴. 交流电机无速度传感器矢量控制系统变结构模型参考自适应转速辨识[J]. *中国电机工程学报*, 2007, 27(15): 70-74.