



基于滑模变结构理论的双馈式风力发电机控制策略

王 芸^{1,2}, 赵栋利¹, 许洪华¹

1. 中国科学院电工研究所, 北京 100190

2. 中国科学院研究生院, 北京 100190

摘要 风力发电作为一种清洁可再生的发电方式, 在全球范围内正以惊人的速度发展。变速恒频双馈式风力发电系统要求双馈电机控制系统具有响应速度快、鲁棒性强的特点。双馈式异步电机 (DFIG) 在参数变化内部扰动和风机负载转矩振荡外部扰动共同影响下, 会导致现有 PI 控制转子电流响应动态性能变差, 电机工作效率和稳定性降低。滑模变结构控制 (SMC) 是一种基于状态空间的非线性控制方法, 进行设计时与对象参数及扰动无关, 这就使得 SMC 控制与 PI 控制策略相比具有快速响应、对参数变化及扰动不敏感的优点。针对上述问题, 本研究在双馈电机控制系统中引入滑模变结构控制, 设计一种基于指数趋近律的积分型滑模变结构控制器, 并利用边界层设计以减小滑模控制的颤振。仿真表明, 该控制策略可提高 DFIG 的动态性能, 增强其抗干扰性, 有效降低 SMC 的颤振, 并具有设计过程简单、易于实现等优点。

关键词 滑模; 双馈式异步电机; 风力发电; 变结构控制

中图分类号 TM310

文献标识码 A

文章编号 1000-7857(2009)21-0103-04

Sliding Mode Control Strategy of DFIG in Wind Power System

WANG Yun^{1,2}, ZHAO Dongli¹, XU Honghua¹

1. Institute of Electrical Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

Abstract Wind power is a clean and renewable energy, and its exploitation is developing rapidly across the world. The Variable Speed Constant Frequency (VSCF) wind power generation system requires the Double Feed Induction Generator (DFIG) to have high response speed as well as good robustness. The DFIG will be affected both by internal disturbance of parametric variations and external disturbance of the load torque oscillation. The dynamics of the current response of the present PI controlled rotor may be in bad conditions. In addition, the above disturbances reduce efficiency and stability of the wind turbine. Slide Mode Control

(SMC) is a kind of nonlinear control methods based on state space and is independent of object parameters and disturbances. Compared with PI control, SMC has a faster response, and is insensitive to the parameter variations and disturbances. This paper proposes a sliding-mode variable structure controller, as an integral action under exponential approximation law. The controller uses the boundary-layer design to reduce the vibration of the sliding-mode control. The simulation indicates that the dynamic performance and the anti-interference ability of DFIG are improved. The vibration is effectively reduced by adopting this control strategy with a simple design process and easy implementation.

Keywords sliding mode; double feed induction generator; wind power; variable structure control

0 引言

风力发电作为一种清洁可再生的发电方式, 在全球范围内正以惊人的速度发展。变速恒频双馈 (VSCF-DFIG) 风力发电系统具有变流器容量小、有功无功独立调节、柔性并网等优点, 已成为目前兆瓦级变速恒频风力发电系统的主流机型^[1]。

双馈式风力发电机在实际运行中承受着来自系统内部和

收稿日期: 2009-09-10

基金项目: 中国高技术研究发展计划 (863 计划) 项目 (2007AA05Z421)

作者简介: 王芸, 博士研究生, 研究方向为风力发电, 电子信箱: wangyun@mail.iee.ac.cn; 许洪华 (通信作者), 研究员, 研究方向为可再生能源发电, 电子信箱: hxu@mail.iee.ac.cn

外部的双重干扰。外部干扰为风速风向呈现随机性变化,引起力矩传动链上的负载转矩振荡^[2];内部干扰为发电机温度、磁饱和程度、集肤效应等因素,电机参数在运行过程中会偏离初始值,导致控制系统设计参数与控制对象不匹配^[3]。这些干扰影响了风力发电机的工作效率、动态性能和鲁棒性。

滑模变结构控制(SMC)是一种基于状态空间的非线性控制方法。控制系统可在动态过程中根据系统当前状态(如状态量的偏差及其各阶导数等)有目的的运动,迫使系统按照预定“滑动模态”的状态轨迹运动^[4]。由于“滑动模态”可进行设计且与对象参数及扰动无关,使 SMC 控制与积分(PI)控制策略相比具有快速响应、对参数变化及扰动不敏感的优点。

文献[5]针对鼠笼式感应电机,设计了在同步 d, q 坐标系下以转子磁链为状态变量的滑模面切换函数,用 SMC 控制实现了鼠笼式感应电机。文献[6]、[7]针对异步电机的矢量控制系统,对其转速控制外环采用了 SMC 以提高速度跟踪的动态响应性能。文献[8]针对独立运行的风力发电机设计了以定子 d, q 轴电压为滑模面切换函数的 SMC 控制器,以提高并网输出电压的准确性和稳定性。对于一个 DFIG 矢量控制系统,电流内环的控制性能决定了整个系统有功无功解耦的准确性,对系统动态响应性能起主导作用,而系统扰动对电流内环动态性能和稳定性的影响更为明显。因此对 DFIG 控制系统中电流内环新型控制策略的研究具有重要意义。

本研究采用定子磁链定向矢量变换技术,针对解耦后的转子 d 、 q 轴电流内环,分别设计了基于指数趋近律的积分型滑模变结构控制器,并利用边界层设计方法减小滑模控制的

振颤问题。通过对新型 SMC 控制系统与传统的 PI 控制系统的对比仿真,证明了 SMC 控制器的有效性和鲁棒性。

1 双馈式异步风力发电机的建模

考虑到系统并网后,DFIG 定子侧运行在工频状态,定子电阻压降远比电机反电势小,因此可以忽略 DFIG 的定子绕组上的铜损^[9]。在定子磁链定向同步旋转 d,q 轴坐标系下的转子 d,q 轴电压方程分别为

$$\begin{cases} u_{dr} = R i_{dr} + (L_r - L_m^2/L_s)(di_{dr}/dt) + \Delta u_{dr} \\ \Delta u_{dr} = -(\omega_1 - \omega_r)(L_r - L_m^2/L_s)i_{or} \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} u_{qr} = R_i \dot{i}_{qr} + (L_r - L_m^2/L_s)(di_{qr}/dt) + \Delta u_{qr} \\ \Delta u_{qr} = (\omega_1 - \omega_r)(L_m/L_s)\psi_s + (\omega_1 - \omega_r)(L_r - L_m^2/L_s)\dot{i}_{dr} \end{cases} \quad (2)$$

式(1)、(2)中, R_s, R_r 分别为定、转子绕组等效电阻; L_s, L_r, L_m 分别为定转子绕组自感和互感; i_{dr}, i_{qr} 分别为转子电流的 d, q 轴分量; u_{dr}, u_{qr} 分别为转子电压的 d, q 轴分量; ω_s, ω_r 分别为转差角速度和转速; ψ_s 为定子磁链。借鉴传统矢量控制中电流内环分别设计 d, q 轴 2 个前向通道, 将交叉耦合项作为前馈补偿的思路^[9], 对转子 d, q 轴电流内环分别设计各自的 SMC 控制器, $\Delta u_{dr}, \Delta u_{qr}$ 作为控制器的持续扰动量做前馈补偿, 这样可以避免多输入、多输出对象 SMC 设计的复杂性, 将控制对象简化为 2 个一阶系统:

$$u_{dr}=R_i i_{dr}+(L_r-L_m^2/L_s)(di_{dr}/dt) \quad (3)$$

$$u_{qr}=R_i i_{qr}+(L_r-L_m^2/L_s)(di_{qr}/dt) \quad (4)$$

设计的 DFIG-SMC 控制系统结构如图 1 所示,其中 SMC 模块为电流内环滑模控制器。

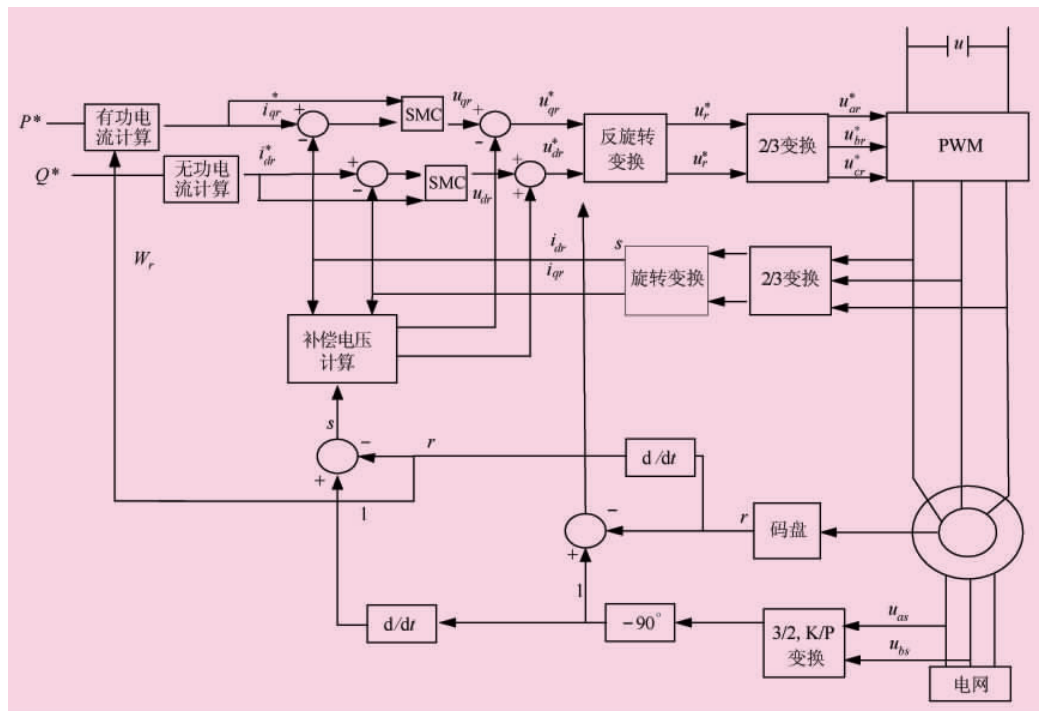


图 1 双馈式风力发电机 SMC 控制系统结构

Fig. 1 Structure diagram of DFIG-SMC control system

2 基于 SMC 的 DFIG 控制系统设计

转子电流 d 轴和 q 轴的滑模控制器设计思路完全相同, 仅控制对象参数有所区别。以转子电流 q 轴 SMC 的设计为例进行说明, 控制对象的方程如式(2)所示。其中漏磁系数为 $\sigma = L_r - L_m^2/L_s$, 状态变量选取为 i_{qr} , 输入变量选取为 u_{qr} , 加上前馈干扰项 Δu_{qr} 后, 控制方程的一阶状态空间表达式为

$$di_{qr}/dt = (-R/\sigma)i_{qr} + (1/\sigma)u_{qr} + (-\Delta u_{qr}/\sigma) \quad (5)$$

转子电流内环的控制目标是尽量使电流实际值准确跟踪电流给定值。定义电流跟踪误差如式(6)所示, 其中 $i_{qr}^*(t)$ 由参考电流给定。

$$e(t) = i_{qr}(t) - i_{qr}^*(t) \quad (6)$$

SMC 控制在跟踪任意轨迹时, 若存在一定的外部扰动, 则可能会带来稳态误差, 不能达到要求性能的指标。采用积分型切换函数的滑模变结构控制可以解决上述问题^[6], 因将滑模面切换函数的设计增加电流跟踪误差的积分项部分, 即

$$s(t) = e(t) + c \int_0^t e(t) dt \quad (7)$$

其中, s 为滑模面的切换函数, c 大于 0。为保证状态变量在到达滑模面之前的动态响应指标, 可采用“趋近率”的办法加以控制^[10]。本研究采用指数趋近率, 即

$$ds/dt = -\beta \text{sign}[s] - ks \quad \beta > 0, k > 0 \quad (8)$$

为保证状态变量在快速趋近滑模面时削弱振颤现象, 应在增大 k 的同时减小 β 。将式(6)~式(8)联立, 可得

$$(di_{qr}/dt) + c(i_{qr} - i_{qr}^*) = -\beta \text{sign}[s] - ks \quad (9)$$

当状态变量从初始点经过指数型趋近到达滑模面后, 由于建模的理想化、实际开关的时间延迟及数字控制的离散化等原因^[11], 导致状态变量将在滑模面两侧以很高的频率来回穿越, 形成“振颤”。通过对切换函数进行边界层设计, 可以约束状态变量在边界层外的控制保持不连续的切换, 而在边界层内状态变量的运动轨迹受一线性约束, 这样当滑动模态趋于稳定时可以减小“振颤”现象。本研究选用饱和函数 $\text{sat}[s]$ 代替符号函数 $\text{sign}[s]$

$$\text{sat}[s] = \begin{cases} s/\xi & |s| \leq \xi, \varepsilon > 0 \\ \text{sign}[s] & |s| > \xi, \varepsilon > 0 \end{cases} \quad (10)$$

边界层厚度为 $[-\varepsilon, \varepsilon]$, 边界层厚度越小, 控制效果越好, 但会使控制增益变大, “振颤”抑制效果减弱^[12]。边界层还会带来变量的稳态误差, 因此引入积分型切换函数非常必要。

状态变量到达滑模面附近后, 可用等效控制进行描述。针对带有不确定性和外加干扰的系统, 采用上述基于指数趋近率的函数切换。联立式(5)、(9)、(10)得到

$$(-R/\sigma)i_{qr} + (1/\sigma)u_{qr} + (-\Delta u_{qr}/\sigma) + c(i_{qr} - i_{qr}^*) = -\beta \text{sat}[s] - ks \quad (11)$$

化简可得转子 d 轴电压输入量 u_{dr}

$$u_{qr} = \sigma[-\beta \text{sat}[s] - ks - c(i_{qr} - i_{qr}^*)] + R_r i_{qr} + \Delta u_{qr} \quad (12)$$

对涉及的所有参数进行选取时须保证控制系统存在性、可达性、稳定性的要求。根据滑动模态广义存在条件 $s ds/dt < 0$, 以上对参数选择范围的约束均满足条件。

3 基于 DFIG 滑模变结构控制系统的仿真

为验证 SMC 控制的性能, 在 Matlab 6.5/Simulink 上分别搭建了额定功率为 22 kW 的双馈电机传统 PI 控制系统和 SMC 控制系统。仿真参数为: $R_s=0.3 \Omega$, $R_r=0.8 \Omega$, $L_m=0.153 \text{ H}$, $L_{ls}=L_{lr}=0.003 \text{ H}$, $J=0.589 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$, $n_p=2$ 。SMC 控制器参数为: $k=150$, $\beta=50$, $c=500$, $\varepsilon=0.05$ 。PI 控制器参数为: $k_p=20$, $k_i=200$ 。

在单位功率因数下系统满功率稳态运行时, 1 s 时刻给有功功率施加一个大小为 -5 kW 的阶跃输入, 图 2 是 SMC 和 PI 控制转子 q 轴和 a 相电流波形对比。可以看出, SMC 控制下电流的动态响应较快, 调节时间约为 2 ms, 小于 PI 控制器的调节时间; 波形的超调量不超过 3%, 且只有一个波峰。转子 a 相电流波形在 SMC 控制和 PI 控制下几乎完全重合, 1/6 个周期内基本可达到稳态, 过渡过程比较平滑。

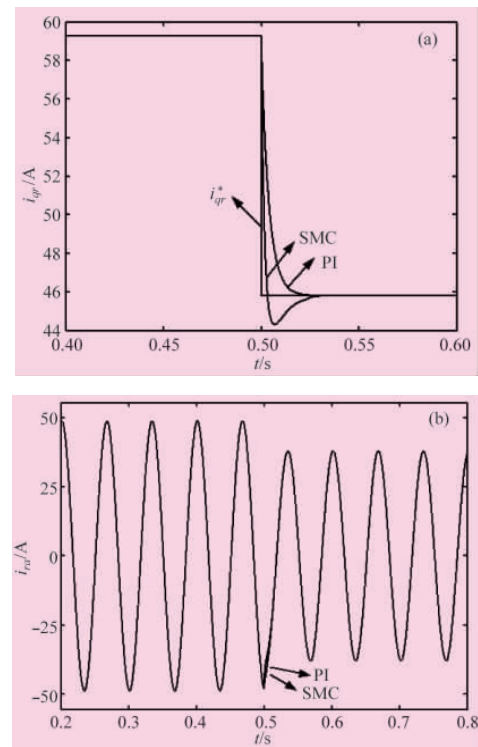


图 2 i_{qr} 阶跃(a)和 i_{ra} (b)响应波形
Fig. 2 i_{qr} step (a) and i_{ra} (b) response waveform

仿真时以标么值为基准建立扰动后的电机参数, 使其定、转子电阻增大 50%, 电感减小 20%, 转动惯量减少 20%。在同样的输入信号给定条件下, 比较 SMC 控制和 PI 控制转子 q 轴和转子 a 相电流波形。如图 3 所示, 可以看出对转子 q 轴电流, SMC 控制几乎不受电机参数内扰的影响, 电流响应波形与参数不变时的波形近似, 仍保持了良好的动态性能。而相比电机参数变化之前, PI 控制的动态性能受到了较大影响, 稳态时间明显变长, 大约持续了 0.2 s, 这说明 SMC 控制对参数变化内扰的鲁棒性要好于 PI 控制。

在 2 s 时刻给负载转矩开始施加一个大小为 -60 N·m、持续时间为 0.2 s 的扰动。图 4 是转子 q 轴和 a 相电流的比较。可以看出, 转矩外扰对 SMC 控制的影响很小, 扰动时电流的

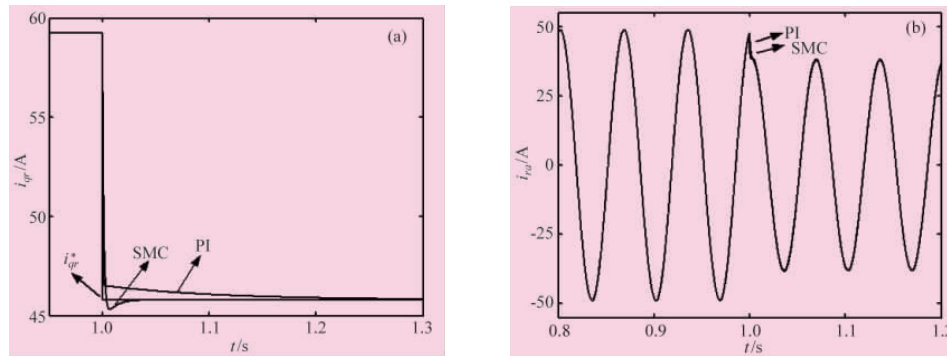


图3 电机参数内扰下 i_{qr} 阶跃(a)和 i_{dr} (b)响应波形

Fig. 3 i_{qr} (a) and i_{dr} (b) step response under internal interference of DFIG parameters

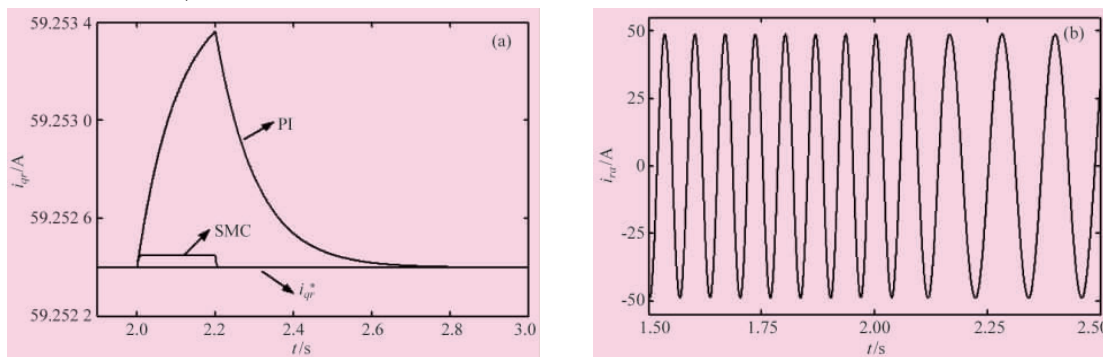


图4 负载转矩扰动下 i_{qr} (a)和 i_{dr} (b)的波形对比

Fig. 4 Comparison of i_{qr} (a) and i_{dr} (b) waveforms under load torque interference

动态降落量远远小于PI控制;同时扰动结束后的恢复时间很短,电流迅速回到稳态。因此SMC控制抗负载转矩外扰的鲁棒性优于PI控制。

4 结论

针对双馈异步电机 d 、 q 轴模型,设计了一种基于指数趋近率的积分型滑模控制器,在此基础上引入了边界层设计以减少滑模系统的“颤振”现象,给出了滑模控制器的详细推导和设计过程。与PI控制的对比仿真表明,该策略提高了转子电流动态响应性能,对电机参数变化和负载转矩扰动的敏感性较低,具有很强的鲁棒性。此控制系统还具有设计过程简单、易于实现等优点,具有良好的发展前景。

参考文献(References)

- [1] 李俊峰, 高虎. 2008 中国风电发展报告 [M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2008: 45-61.
Li Junfeng, Gao Hu. China wind power report [M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2008: 45-61.
- [2] 杨金明, 吴捷. 风力发电系统中控制技术的最近发展 [J]. 中国电力, 2003, 36(8): 65-67.
Yang Jinming, Wu Jie. *Electric Power*, 2003, 36(8): 65-67.
- [3] 徐小增, 李叶松, 秦亿. 矢量控制感应电机参数变化的影响研究[J]. 华中科技大学学报: 自然科学版, 2003, 30(7): 43-45.
Xu Xiaozeng, Li Yezeng, Qin Yi. *Huazhong University of Science & Technology: Nature Science Edition*, 2003, 30(7): 43-45.
- [4] Utkin V I. Sliding mode control design principles and applications to

- electric drives [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 1993, 40 (1): 23-36.
- [5] M-Mahmoud S, Chrifi-Alaoui L, Van Assche V, et al. Sliding mode control based on field orientation for an induction motor [C]//IEEE IECON, 31st Annual Conference of IEEE. 2005: 281-286.
- [6] 杨文强, 蔡旭, 姜建国. 矢量控制系统的积分型滑模变结构速度控制 [J]. 上海交通大学学报, 2005, 39(3): 426-432.
Yang Wenqiang, Cai Xu, Jiang Jianguo. *Journal of Shanghai Jiaotong University*, 2005, 39(3): 426-432.
- [7] Mitova D, Mira C, de Fornel B. Speed control of an asynchronous motor by using variable structure control [C]//IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics. 1993, 4: 447-452.
- [8] Galindo R, Cotorogea M, Biel D. Two families of sliding mode controllers for a doubly-fed induction generator in an isolated generation system[C] //IEEE Electronics, Robotics and Automotive Mechanics Conference. 2007, 5(2): 115-121.
- [9] 赵栋利, 郭金东, 许洪华. 变速恒频双馈风力发电机有功、无功解耦控制研究与实现[J]. 太阳能学报, 2006, 27(2): 174-179.
Zhao Dongli, Guo Jindong, Xu Honghua. *Acta Energiæ Solaris Sinica*, 2006, 27(2): 174-179.
- [10] 王丰饶. 滑模变结构控制[M]. 北京: 机械工业出版社, 1995: 45-47.
Wang Fengrao. *Sliding-mode control* [M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 1995: 45-47.
- [11] Utkin V I, Lee H. The chattering analysis[C]//12th International Power Electronics and Motion Control Conference, Portoroz, Sloveniz, IEEE, 2006: 2014-2019.
- [12] 田宏奇. 滑模控制理论及其应用 [M]. 武汉: 武汉出版社, 1995: 164-166.
Tian Hongqi. *Sliding mode control theory and its application* [M]. Wuhan: Wuhan Press, 1995: 164-166.

(责任编辑 陈广仁)