

# 一种基于模糊滑模控制的双馈风机空载并网方法

杨进锋 罗成

中车株洲电力机车研究所有限公司 湖南 株洲 412001

**[摘要]**通过分析交流励磁变速恒频双馈风机的运行特点,建立双馈风机的数学模型;根据矢量控制方法,设计了一种变速恒频双馈风机的滑模变结构并网控制方法,使系统对电网电压波动和内部参数扰动都具有较好的鲁棒性;为了消除滑模控制的抖振问题,引入了模糊控制;通过将基于模糊滑模变结构的控制系统的仿真,证明了该基于模糊滑模变结构的控制系统更具有较好的动态响应和鲁棒性。

**[关键词]**双馈风机;变速恒频;滑模变结构控制;空载并网

**【DOI】**10.12252/j.issn.2096-6261.2020.02.1234

## 1 引言

随着风电机组单机容量和风电场规模已越来越大,风力机在并网时可能产生对电网的电流冲击已不容忽视,如何限制风力发电机组在并网时出现的瞬间大电流,避免对电网造成过大冲击已成为风力发电技术的一个重要研究方向<sup>[1][2][3]</sup>。

在实际运行中,风力发电系统承受着外部输入波动和内部系统参数变化等双重扰动<sup>[4]</sup>。外部输入波动主要指风速风向随机变化,电网电压、频率都有可能发生一定范围的波动;内部系统参数指由于温升效应,使发电机、变流器内的器件参数发生变化,并且由于现场施工等原因,都有可能影响控制系统的设计参数与实际系统不匹配,这些都严重影响系统的并网性能,甚至导致并网失败。

模糊控制理论作为一种常用的现代控制理论,可以不需要被控对象的精确数学模型,从而针对风力发电机组这种复杂的强非线性系统具有很强的现实意义。模糊控制从本质上看是自适应的,可以较好的解决控制对象参数不精确的问题,它是通过专家知识或者操作者的经验来构建控制规则<sup>[5]</sup>。有些研究人员通过将模糊控制引入到滑模控制器中,设计出了各种模糊滑模控制器<sup>[6]</sup>,从而有效地提高了滑模控制的性能,并且削弱了滑模控制器的抖振问题。

本文将模糊滑模变结构控制应用到双馈风机的空载并网中,通过对矢量变换后转子电流的 $d$ 轴和 $q$ 轴分量进行控制,选择积分型滑模面函数,保证系统在动态响应全过程都具有鲁棒性,最后通仿真证明了此方法的有效性。

## 2 DFIG的并网数学模型

根据相关文献,得到定子电压定向的 $dq$ 同步旋转坐标系内双馈风力发电机的数学模型<sup>[7]</sup>:

定子绕组电压方程:

$$\begin{cases} u_{ds} = -R_s i_{ds} + d\psi_{ds} - \omega_s \psi_{qs} \\ u_{qs} = -R_s i_{qs} + d\psi_{qs} + \omega_s \psi_{ds} \end{cases} \quad (1)$$

转子绕组电压方程:

$$\begin{cases} u_{dr} = R_r i_{dr} + d\psi_{dr} - \omega_s \psi_{qr} \\ u_{qr} = -R_r i_{qr} + d\psi_{qr} + \omega_s \psi_{dr} \end{cases} \quad (2)$$

定子磁链方程:

$$\begin{cases} \psi_{ds} = -L_s i_{ds} + L_{sr} i_{dr} \\ \psi_{qs} = -L_s i_{qs} + L_{sr} i_{qr} \end{cases} \quad (3)$$

转子磁链方程:

$$\begin{cases} \psi_{dr} = -L_{sr} i_{ds} + L_r i_{dr} \\ \psi_{qr} = -L_{sr} i_{qs} + L_r i_{qr} \end{cases} \quad (4)$$

式中: $L_s$ 、 $L_r$ 、 $L_{sr}$ 分别为 $dq$ 坐标系定、转子等效自感及定、转子等效互感; $R_s$ 、 $R_r$ 为定、转子绕组电阻; $i_{ds}$ 、 $i_{qs}$ 、 $i_{dr}$ 、 $i_{qr}$ 分别为定、转子电流 $dq$ 轴分量; $u_{ds}$ 、 $u_{qs}$ 、 $u_{dr}$ 、 $u_{qr}$ 分别为定、转子电压 $dq$ 轴分量; $\omega_s$ 为 $dq$ 坐标系的角速度; $\omega_s$ 为 $dq$ 坐标系相对于转子的角速度; $\psi_{ds}$ 、 $\psi_{qs}$ 、 $\psi_{dr}$ 、 $\psi_{qr}$ 定转

子磁链的 $d$ 、 $q$ 轴分量。

在空载时双馈风力发电机定子与电网断开,各分量电流为零,即 $i_{ds} = i_{qs} = 0$ ,将(3)、(4)式代入(1)、(2)式,可得DFIG空载时的定、转子电压与电流之间的关系为:

$$\begin{cases} u_{ds} = L_{sr} di_{dr} - L_{sr} \omega_s i_{qr} \\ u_{qs} = L_{sr} di_{qr} + L_{sr} \omega_s i_{dr} \\ u_{dr} = R_r i_{dr} + L_r di_{dr} - \omega_s L_r i_{qr} \\ u_{qr} = R_r i_{qr} + L_r di_{qr} + \omega_s L_r i_{dr} \end{cases} \quad (5)$$

通过对(5)式中,转子电压整理,可得到:

$$\begin{cases} u_{dr} = (R_r + L_r d) i_{dr} - \omega_s L_r i_{qr} \\ u_{qr} = (R_r + L_r d) i_{qr} + \omega_s L_r i_{dr} \end{cases} \quad (6)$$

从(6)式中可得,可以通过控制 $i_{dr}$ 、 $i_{qr}$ 达到控制 $u_{dr}$ 、 $u_{qr}$ 的目的。本文将根据滑模变结构控制原理,对DFIG的转子电流进行控制,从而达到并网过程中DFIG和电网之间的“柔性连接”。

## 3 基于SMC的DFIG控制系统设计

定义滑模面切换函数:

$$\begin{cases} s_d = k_1 [e_d - e_d(0)] + c_1 \int_0^t e_d dt \\ s_q = k_2 [e_q - e_q(0)] + c_2 \int_0^t e_q dt \end{cases} \quad (7)$$

其中, $e_d = i_{dr}^* - i_{dr}$ , $e_q = i_{qr}^* - i_{qr}$ , $i_{dr}^*$ 、 $i_{qr}^*$ 分别为 $i_{dr}$ 、 $i_{qr}$ 的期望值。 $k_1 > 0$ , $k_2 > 0$ , $c_1 > 0$ , $c_2 > 0$ 。采用积分项 $\int_0^t e dt$ 后,不仅可以消除系统的外部扰动,还可以通过选择合适的积分项初始值使系统在动态响应全过程都具有鲁棒性<sup>[8]</sup>,因此在滑模面切换函数设计中增加电流跟踪误差的积分项。式中 $e_d(0)$ 表示初始 $t=0$ 时 $e_d$ 的值,显然,在 $t=0$ 时, $s_d(0) = s_q(0) = 0$ ,从而保证了在初始时刻系统滑模轨迹就在切换面上,缩短了到达时间。

对(7)式求导,则有:

$$\begin{cases} \dot{s}_d = k_1 \dot{e}_d + c_1 \dot{e}_d = k_1 (\dot{i}_{dr}^* - \dot{i}_{dr}) + c_1 \dot{e}_d \\ \dot{s}_q = k_2 \dot{e}_q + c_2 \dot{e}_q = k_2 (\dot{i}_{qr}^* - \dot{i}_{qr}) + c_2 \dot{e}_q \end{cases} \quad (8)$$

引入指数趋近律,即令

$$\begin{cases} \dot{s}_d = -\varepsilon_d \operatorname{sgn}(s_d) - k_d s_d \\ \dot{s}_q = -\varepsilon_q \operatorname{sgn}(s_q) - k_q s_q \end{cases} \quad (9)$$

式中, $\varepsilon_d > 0, k_d > 0, \varepsilon_q > 0, k_q > 0$ 。

对于式(7)、式(9)中的用 $s_d$ 滑模面切换函数建立的系统,有

$$\begin{aligned} s_d \dot{s}_d &= s_d [-\varepsilon_d \operatorname{sgn}(s_d) - k_d s_d] \\ &= -\varepsilon_d |s_d| - k_d s_d^2 < 0 \end{aligned} \quad (10)$$

因此,当 $s_d \neq 0$ 时,有 $s_d \dot{s}_d < 0$ 。从而根据Lyapunov稳定性定理,可以得知系统将会在有限的时间内到滑模面,并且当系统达到滑模面时,系统稳定在参考点。同理可证,用 $s_q$ 滑模面切换函数建立的系统也具有Lyapunov稳定性。

根据(8)、(9)式,可得系统的控制律:

$$\begin{cases} u_{dr} = u_{dreq} + u_{drn} \\ u_{qr} = u_{qreq} + u_{qrn} \end{cases} \quad (11)$$

式中:

$$\begin{cases} u_{dreq} = R_r i_{dr} - \omega_s L_r i_{qr} \\ u_{qrreq} = R_r i_{qr} + \omega_s L_r i_{dr} \\ u_{drn} = \frac{L_r}{k_1} [k_1 i_{dr}^* + c_1 i_{dr}^* - c_1 i_{dr} - (-\varepsilon_d \operatorname{sgn}(s_d) - k_d s_d)] \\ u_{qrn} = \frac{L_r}{k_2} [k_2 i_{qr}^* + c_2 i_{qr}^* - c_2 i_{qr} - (-\varepsilon_q \operatorname{sgn}(s_q) - k_q s_q)] \end{cases}$$

基于滑模变结构控制的双馈风机并网控制的原理框图如图1。

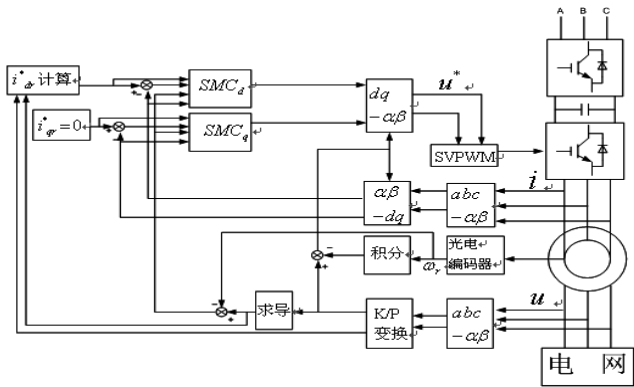


图1 基于滑模变结构控制的双馈风机并网控制原理框图

#### 4 模糊控制与滑模控制

针对滑模控制在实际系统应用中所引起的抖振现象, 研究人员采用连续化的方法来消除, 即将最终滑动模态的切换控制连续化, 或者用饱和函数替代符号函数, 以达到消除抖振的同时消除不变性所表达的完全鲁棒性<sup>[8]</sup>。

如式(9)中的:

$$\dot{s}_q = -\varepsilon_q \operatorname{sgn}(s_q) - k_q s_q \quad (10)$$

当  $\dot{s}_q$  很小时, 其相轨线接近切换面, 则有:

$$\begin{cases} \dot{s}_q = -\varepsilon_q, s_q > 0 \\ \dot{s}_q = +\varepsilon_q, s_q < 0 \end{cases} \quad (11)$$

式中, 参数  $\varepsilon_q$  轨迹是到达切换面的趋近速度。一方面, 只要  $\varepsilon_q$  足够小, 就可以保证趋近速度小, 使切换后的滞后就小, 从而抖振自然就小。反之, 将导致强抖振; 另一方面,  $\varepsilon_q$  太小又将导致趋近速度太慢。为了提升轨迹的趋近速度, 研究人员在减小  $\varepsilon_q$  的同时增大  $k_q$  值, 以达到快速趋近又削弱抖振的目的。

可以通过设计一个模糊控制器, 达到这一目标。将控制器的设定值与实际值的偏差, 以及偏差的变化率做为模糊控制器的控制对象, 将模糊控制器的输出  $uf(k)$  对滑模控制器进行调整。其中

$$uf(k) = \frac{\sum_{i=1}^n x_i \mu(i)}{\sum_{i=1}^n \mu(i)} \quad (12)$$

#### 5 系统仿真与实验台应用实验分析

为了验证本文所提出的控制方法的有效性, 本文通过在 PSIM 仿真应用包软件平台上搭建 DFIG 空载并网的仿真模型, 并在实验室的背靠背实验台上进行实际实验。所用的参数如下: 额定电压  $U_N = 690V$ , 额定功率  $P_N = 1.65MW$ , 额定频率  $f = 50Hz$ , 定子绕组电阻  $R_s = 0.00784\Omega$ , 转子绕组电阻

$R_r = 0.0059\Omega$ , 定子绕组漏感  $L_{s\sigma} = 0.053\Omega$ , 转子绕组漏感  $L_{r\sigma} = 0.062\Omega$ , 互感  $L_m = 3.71\Omega$ , 极对数  $p = 2$ , 直流母线电压  $U_{dc} = 1150V$ 。

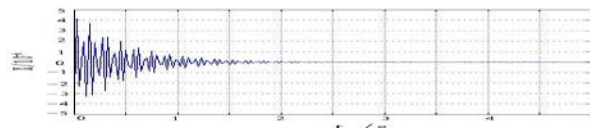


图3 模糊滑模控制振动波形

其中, 图2和图3为系统存在外部干扰时, 分别采用滑模控制器和模糊滑模控制器的振动情况仿真, 虽然两者都在 1.5s 左右抑制住了系统的抖振, 但是明显可以看出模糊滑模控制器的效果更好。

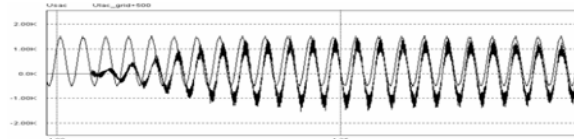


图4 同步调整仿真波形图

图4为定子电压与电网电压的对比波形(为了观看清楚已将电网电压在Y轴上进行了位移)。从仿真中可以看出, 基于变结构控制的变流器系统可以较好地完成并网过程。

#### 6 结语

本文通过建立空载并网的DFIG数学模型, 对矢量变换后转子电流的  $d$  轴和  $q$  轴分量进行控制, 选择模糊滑模控制器, 保证系统在动态响应全过程都具有鲁棒性, 提高系统的并网性能, 并且顺利实现了并网以及并网后与最大风能追踪运行模式的切换。通PSIM仿真应用包软件仿真实验表明, 在基于变结构控制的变流器系统下, DFIG定子电压调整速度快, 定、转子电流冲击小, 过渡平稳, 并网性能好, 验证了此并网方法的可靠性, 为其实际应用提供了可信的依据。

#### 参考文献

- [1] 张丽英, 叶廷路, 辛耀中, 等. 大规模风电接入电网的相关问题及措施[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(25): 1-9.
- [2] 付旺保, 赵栋利, 潘磊, 等. 基于自抗扰控制器的变速恒频风力发电并网控制[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(3): 13-18.
- [3] 刘其辉, 贺益康, 卞松江. 变速恒频风力发电机空载并网控制[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(3): 6-11.
- [4] 陈家伟, 陈杰, 陈冉, 等. 变速风力发电机组自适应模糊控制[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(21): 93-101.
- [5] F. J. Lin and S. L. Chiu. Adaptive Fuzzy Sliding mode Control for PM Synchronous Servo Motor Drivers[J]. IEEE Proc. Control Theory Appl., 1998, Vol. 145, No. 1, 63 ~ 72.
- [6] Y. S. Lu and J. S. Chen. A Self organizing Fuzzy Sliding mode Controller Design for a Class of Nonlinear Servo System[J]. IEEE Trans. Industrial Electronics, 1994, Vol. 41, No. 5, 492 ~ 502.
- [7] 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.
- [8] 一类不确定性二阶振动系统的自适应滑模控制[J]. 吉林大学学报(工学版), 2011, 41(1): 245-248.

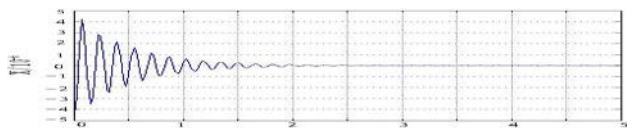


图2 滑模控制振动波形