

DOI: 10.7667/PSPC161664

# 垂直轴 SRG 风力发电系统 MPPT 动态滑模控制研究

谭阳<sup>1</sup>, 吴国庆<sup>1,2</sup>, 茅靖峰<sup>1,2</sup>, 於天浩<sup>1</sup>, 张旭东<sup>1</sup>

(1. 南通大学电气工程学院, 江苏 南通 226019; 2. 江苏省风能应用技术工程中心, 江苏 南通 226019)

**摘要:** 以垂直轴风力机与开关磁阻发电机(SRG)为对象, 研究了基于风速跟踪的垂直轴开关磁阻风力发电系统 MPPT 动态滑模控制(SMC)算法。介绍了 SMC 原理, 设计了系统动态滑模控制器, 采用 Matlab/simulink 建立了系统仿真模型, 对风速阶跃变化的不同工况进行理论仿真实验。仿真结果表明, 所设计的 SRG 风力发电滑模控制器具有良好的鲁棒性, 能使开关磁阻风力发电系统具有良好的动态性能实现风力机最大功率点跟踪, 为实际应用提供理论支持。

**关键词:** 开关磁阻发电机; 风力发电; 滑模控制; 最大功率跟踪; 仿真试验

## Research on dynamic sliding mode control applied in MPPT of SRG for the vertical axis wind power generation system

TAN Yang<sup>1</sup>, WU Guoqing<sup>1,2</sup>, MAO Jingfeng<sup>1,2</sup>, YU Tianhao<sup>1</sup>, ZHANG Xudong<sup>1</sup>

(1. School of Electrical Engineering, Nantong University, Nantong 226019, China;

2. Jiangsu Engineering Research Center for Wind Energy Application, Nantong 226019, China)

**Abstract:** The vertical axis wind turbine and Switched Reluctance Generator (SRG) are regarded as objects. Based on the tracking of wind speed, vertical axis switch reluctance wind power system MPPT dynamic Sliding Mode Control (SMC) algorithm is studied, the principle of SMC is introduced, and the sliding mode controller is designed. Matlab/simulink is used to establish the system simulation model, step changes of wind speed in different condition are simulated. The simulation results show that the design of SRG wind power synovial controller has good robustness, and can make the switch reluctance wind power generation system have good dynamic performance to achieve maximum power point tracking and to provide theoretical support for the practical application.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 61273151 and No. 51376096) and Natural Science Foundation of Jiangsu Province (No. BK20141238).

**Key words:** switched reluctance generator; wind power generation; sliding mode control; maximum power point tracking; simulation experiment

## 0 引言

随着全球能源互联网概念的提出与构建, 清洁替代与电能替代已成为全球能源发展的必然趋势。作为全球能源互联网技术创新之一的电源技术将会成为相关高校和企业研究的一个热点, 尤其是风力发电技术与分布式电源技术。目前, 同步发电机、异步发电机和双馈异步电机被广泛用来当作分布式风力发电机使用, 但是这些传统电机存在诸如调速

范围窄、效率低、体积大和维护成本高等缺陷<sup>[1-4]</sup>。相较于传统发电机, 开关磁阻发电机(SRG)没有永磁体并且转子上无绕组, 结构简单可靠, 同时具有发电效率高、启动转矩小、耐高温和成本低等特点, 非常适合变速风力驱动发电条件。

当前, 国内外关于SRG用于小型离网风力发电研究兴趣逐渐上升, 并且大多数集中在SRG本身的控制上, 对于如何进行SRG与风力机的联合控制以实现系统的最大风能跟踪控制, 提高风力发电的质量和效率相关研究较少。文献[5]针对影响SRG输出的控制参数展开研究, 提出了实现SRG最大输出功率的控制原则。文献[6]针对小型风力发电系统运行

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(61273151, 51376096), 江苏省自然科学基金(BK20141238)

速度低的特点, 采用电流斩波控制(CCC)方式, 在Matlab中建立了SRG电压反馈控制仿真系统, 验证了SRG用于小型变速恒频风力发电系统的有效性。文献[7]建立12/10SRG风力发电系统模型, 通过引入了恒阻抗控制电路详细阐述了系统实现最大功率追踪算法, 但在功率跟踪精度上存在不足, 有待提高。由于SRG具有很强的非线性特点, 使得传统的PID控制策略在SRG最大功率跟踪上存在较大误差, 稳定性较差。近年来, 一些诸如模糊控制、神经网络、滑模变结构控制已被有关学者应用到SRG功率控制上来。文献[8]提出了一种基于模糊PI控制器的改进型转速反馈MPPT策略, 当风速发生变化时, 使系统运行于最佳工作点。文献[9-13]探索了将滑模变结构控制策略应用到开关磁阻电动机中, 降低了转矩脉动, 提高了系统的稳定性、鲁棒性。鉴于开关磁阻电机具有四象限运行的特点, 本文研究垂直轴开关磁阻风力发电系统MPPT动态滑模控制器设计, 该控制器能够有效降低SRG发电运行时由非线性引起的输出功率脉动, 并在Matlab/simulink中建立了系统仿真模型, 对不同风速、风速阶跃变化不同工况进行仿真研究。

## 1 系统模型与问题提出

图1为垂直轴开关磁阻风力发电系统结构图, SRG与垂直轴风力机同轴相连, 一定风速下, 风力机驱动SRG运行, 在控制器的作用下, 将机械能转化成电能。其中, 风力机是整个发电系统能量转换的重要部件, 决定了整个系统输出功率大小。

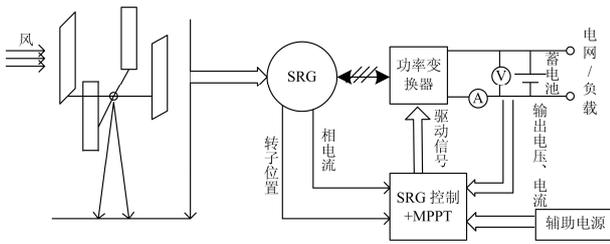


图1 垂直轴SRG风力发电系统

Fig. 1 Vertical axis SRG wind power generation system

### 1.1 风力机数学模型

由贝茨定理可知, 风力机输出的机械功率  $P_a$  为

$$P_a = \frac{1}{2} \rho A C_p v^3 \quad (1)$$

式中:  $A = \pi R^2$ ,  $R$  为风机受风半径(单位: m);  $\rho$  为空气密度(单位:  $\text{kg}/\text{m}^3$ ),  $C_p$  为风能利用系数。文献[14]给出了  $C_p$  与桨距角  $\beta$  与叶尖速比  $\lambda$  的函数关系, 即

$$C_p(\lambda, \beta) = K_1 \left( \frac{K_2}{\lambda^2} - K_3 \beta - K_4 \right) e^{\frac{K_5}{\lambda}} + K_6 \lambda \quad (2)$$

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + K_7 \beta} - \frac{K_8}{\beta^3 + 1} \quad (3)$$

式中:  $K_1 - K_8$  为常数;  $\lambda = \omega R$ , 代入式(1)中得到式(4)。

$$P_a = \frac{1}{2} \rho \pi C_p \frac{R^5}{\lambda^3} \omega_i^3 \quad (4)$$

又风力机驱动转矩  $T_a = P_a / \omega$ , 从而得到

$$T_a = \frac{P_a}{\omega_i} = \frac{1}{2} \rho \pi C_p \frac{R^5}{\lambda^3} \omega_i^2 \quad (5)$$

### 1.2 SRG 数学模型

设  $U_j$  为SRG相电压,  $\Gamma$  为相磁链,  $i_j$  为相电流,  $R_s$  为相绕组内阻, 则有SRG电路方程

$$U_j = i_j R_s + \frac{d\Gamma}{dt} \quad (6)$$

电磁转矩可以基于以下方程计算得到

$$\Gamma = \int (U_j - i_j R_s) dt \quad (7)$$

$$W' = \int_0^i \Gamma di \quad (8)$$

$$T_e = \frac{\partial W'}{\partial \theta} \Big|_{i=\text{constant}} \quad (9)$$

式中:  $W'$  为磁共能;  $\theta$  为转子位置;  $T_e$  为电磁转矩。

定义相绕组磁链为  $\Gamma(i, \theta)$ , 相绕组电感为  $L(i, \theta)$ , 即有:  $\Gamma(i, \theta) = L(i, \theta)i$ , 代入式(6)中, 有

$$U_j = L \frac{di_j}{dt} + i_j \omega \frac{dL}{dt} + i_j R_s \quad (10)$$

式中:  $\omega = \frac{d\theta}{dt}$ ;  $L$  为相电感。若忽略磁链饱和, 即相电感与电流无关, 则有

$$T_e = \frac{1}{2} i^2 \frac{\partial L}{\partial \theta} \quad (11)$$

### 1.3 系统机电方程

系统实际运行中, 垂直轴风力机与SRG同轴相连, 直接驱动SRG实现风力发电, 因而有  $\omega_r = \omega_i$ 。系统运动方程可通过式(12)进行描述。

$$\frac{d^2 \theta}{dt^2} = \frac{1}{J} (T_a + T_e - B \omega) \quad (12)$$

式中:  $T_a$  为风力机驱动转矩;  $B$  为摩擦系数;  $J$  为转动惯量;  $T_e$  为六相SRG合成电磁转矩, 即有

$$T_e = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^6 i_j^2 \frac{\partial L}{\partial \theta} \quad (13)$$

根据转速与角度关系式, 将式(13)代入式(12)中, 则有

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{J} \left( T_a + \frac{1}{2} \sum_{j=1}^6 i_j^2 \frac{\partial L}{\partial \theta} - B\omega \right) \quad (14)$$

#### 1.4 问题提出

在额定风速运行条件下, 风力机的主要目标就是实现风力机捕捉风能最大化。很显然,  $\beta$  和  $\lambda$  是影响功率系数大小的两个重要参数。当  $\beta$  一定时,  $C_p$  与  $\lambda$  的关系如图 2 所示。从图中可以看出  $\beta$  一定时,  $C_p$  随叶尖速比  $\lambda$  先增大, 后减小, 且存在最佳叶尖速比  $\lambda_{opt}$  对应最大的风能利用系数  $C_{pmax}$ 。

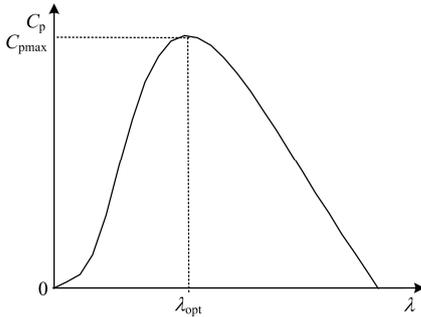


图 2 风力机  $C_p$ - $\lambda$  曲线

Fig. 2  $C_p$ - $\lambda$  curve of wind turbine

当  $\beta$  值不断增大时, 同一  $\lambda$  值对应的  $C_p$  逐渐减小, 因而存在

$$C_p(\lambda_{opt}, \beta_{opt}) = C_{pmax} \quad (15)$$

$$\lambda_{opt} = \frac{\omega_{opt} R_t}{v} \quad (16)$$

式中,  $\beta_{opt}$ 、 $\omega_{opt}$  分别是最佳桨距角以及最佳叶尖速比下的风力机的最佳角速度。然后, 将式(15)与式(16)代入式(4)与式(5)中, 得到最大功率  $P_{amax}$  与最大扭矩  $T_{opt}$  的计算表达式如式(17)、式(18)。

$$P_{amax} = \frac{1}{2} \rho \pi C_{pmax} \frac{R_t^5}{\lambda_{opt}^3} \omega_t^3 = K_{opt} \omega_t^3 \quad (17)$$

$$T_{opt} = \frac{P_{amax}}{\omega_{opt}} = K_{opt} \omega_t^2 \quad (18)$$

式中,  $K_{opt}$  为功率系数, 其大小可以通过式(19)计算得到。

$$K_{opt} = \frac{1}{2\lambda_{opt}^3} \rho \pi C_{pmax} R_t^5 \quad (19)$$

当风力机输出功率低于额定功率时, 为了充分利用风能, 实现最大功率跟踪, 通常情况下  $\beta_{opt}$  取 0。当风速发生变化时, 可以采取调节风力机转速, 使其保持在  $\lambda_{opt}$  条件下, 计算出在最佳值的 SRG 所需最佳转速, 使系统在最大风能利用率下运行, 实现 MPPT<sup>[15-17]</sup>。

## 2 MPPT 滑模控制器设计

### 2.1 滑模控制原理

滑模控制的数学基础是状态方程。图 3 是滑模控制的基本原理图。假设系统滑模变量  $x$  是给定值与反馈值之间的偏差量。图中原点  $O$  是滑模变量的终点。滑模面  $s$  通常取

$$s = cx + \dot{x} \quad (20)$$

滑模控制量定义为

$$u_i(x, t) = \begin{cases} u_i^+(x, t), & s_i(x, t) > 0, \\ u_i^-(x, t), & s_i(x, t) < 0, \end{cases} \quad i = 1, \dots, m \quad (21)$$

其中,  $u_i^+(x, t) \neq u_i^-(x, t)$ 。

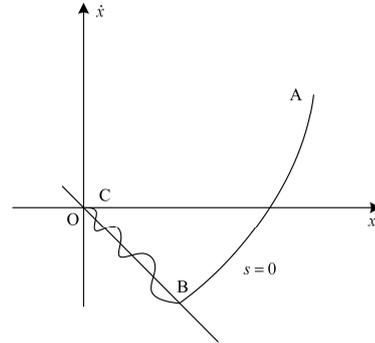


图 3 滑模变结构动态图

Fig. 3 Dynamic figure of sliding mode variable structure

系统状态变量从 A 点运行到滑模面的 B 点, AB 段是趋近运动。控制律  $u_i^+(x, t)$  或  $u_i^-(x, t)$ , 系统结构能够保持。图 3 中的 BC 段为滑模控制下状态变量的轨迹。

由滑模控制理论可知, 对于任何一个无扰动非线性系统有<sup>[18]</sup>

$$\dot{x} = f(x) + bu \quad (22)$$

式中:  $x$  为系统的状态变量;  $u$  为系统的输入。

取滑模平面为

$$s = cx \quad (23)$$

$c$  为滑模平面参数, 满足赫尔维茨多项式。那么

$$\dot{s} = c\dot{x} = cf(x) + cbu \quad (24)$$

设  $\dot{s} = 0$ , 则可得到系统式(22)的等效控制为

$$u_{eq} = -(cb)^{-1} cf(x) \quad (25)$$

而对于一个不确定非线性系统往往满足如下方程

$$\dot{x} = f(x) + \Delta f(x) + v + bu \quad (26)$$

式中:  $\Delta f(x)$  为系统参数摄动;  $v$  为系统的外部干扰。将系统参数摄动及外部干扰设为一个扰动变量  $d = \Delta f(x) + v$ , 则式(26)改写为

$$\dot{x} = f(x) + d + bu \quad (27)$$

同理得到系统式(27)的等效控制为

$$u_{eq1} = -(cb)^{-1}cf(x) - (cb)^{-1}cd \quad (28)$$

若某一时刻方程(27)满足,根据滑动模态的存在性可知,当运动点到达切换面  $s=0$  附近时,必有  $\lim_{s \rightarrow 0^+} \dot{s} \leq 0$  及  $\lim_{s \rightarrow 0^+} \dot{s} \geq 0$ , 若状态轨迹维持在滑模面上,则有

$$y = s(t, x) = \dot{s}(t, x) = 0 \quad (29)$$

为了加速系统收敛速率,本文采取式(30)的指数收敛率。

$$\dot{s} = -\varepsilon |s|^\alpha \text{sign}(s) \quad (30)$$

这里,  $\varepsilon$  是任一大于 0 的常数,  $\alpha$  是指数系数,且  $0 < \alpha < 1$ 。  $\varepsilon |s|^\alpha$  具有负反馈的特点,其绝对值大小决定了滑模函数运动过程中收敛速率。然后,选取李雅普诺夫函数  $V=s^2/2$ , 可以得到

$$\dot{V}(t) = s\dot{s} = -\varepsilon |s|^{1+\alpha} < 0 \quad (31)$$

因此,证明式(28)中的控制量能保证系统运动在滑模面上,并且能在有限的时间内收敛。

### 2.2 SMC 控制器设计

滑模控制器的设计需要两步:第一步选择合适的滑模面,系统能够按照期望的状态运行在滑模面上;第二步选取合适的控制律,使系统在有限的时间内能够到达滑模面,并最终达到平衡状态。滑模控制应用在垂直轴 SRG 最大功率跟踪框图如图 4 所示。

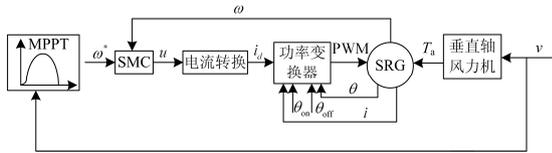


图 4 控制系统原理图

Fig. 4 Principle diagram of the control system

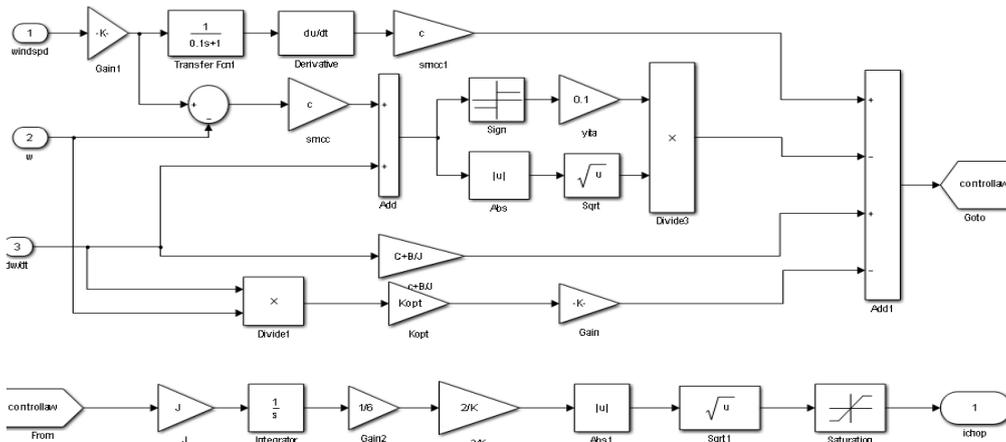


图 5 SMC 模块图

Fig. 5 Chart of SMC module

取状态变量为  $x_1 = \omega^* - \omega$ ,  $x_2 = d\omega/dt$ , 则有  $\dot{x}_1 = -x_2$ , 令  $u = \dot{T}_e$ , 结合式(14)可得到开关磁阻发电机状态空间表达式为<sup>[19]</sup>

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 0 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ b \end{bmatrix} u + \begin{bmatrix} 0 \\ b \end{bmatrix} \tau \quad (32)$$

式中:  $a=-B/J$ ;  $b=1/J$ ;  $u$  滑模控制器的控制量;  $\tau$  为干扰量,  $\tau = \dot{T}_a = 2K_{opt}\omega_t\dot{\omega}_t$ 。根据式(23), 得到滑模函数

$$s(t, x) = cx_1 + x_2 \quad (33)$$

将式(33)两边同时求导, 则有

$$\begin{aligned} \dot{s} &= c\dot{x}_1 + \dot{x}_2 = c\dot{\omega}^* - c\dot{\omega} - \ddot{\omega} \\ &= c\dot{\omega}^* - (c + \frac{B}{J})\dot{\omega} + \frac{u}{J} + \frac{1}{J}\tau \end{aligned} \quad (34)$$

根据式(30)选择指数收敛率, 可以计算推导出控制量  $u$  的表达式为

$$u = J \left[ c\dot{\omega}^* + (c + \frac{B}{J})\dot{\omega} - \frac{2}{J}K_{opt}\omega\dot{\omega} - \varepsilon |s|^\alpha \text{sign}(s) \right] \quad (35)$$

再根据式(11), 则有

$$u = \dot{T}_e = \frac{1}{2} \frac{dL}{d\theta} \frac{di^2}{dt} \quad (36)$$

从控制量  $u$  得到电流平均值<sup>[20]</sup>

$$i_d = \sqrt{\int u dt / k} \quad (37)$$

式中,  $k = \frac{1}{2} \frac{\partial L}{\partial \theta}$ , 图 5 是根据式(35)和式(36)在 Simulink 中搭建的动态 SMC 模块图。

### 3 仿真试验与分析

本次研究的 SRG 样机为六相(12/10 极)开关磁阻发电机, 其参数如表 1 所示。风力机桨叶半径  $R=2\text{ m}$ , 空气密度  $\rho=1.25\text{ kg/m}^3$ , 整套系统模型如图 6 所示。

表 1 SRG 样机相关参数

Table 1 Related parameters of SRG prototype

参数	数值
定子极数 $N$	12
转子极数 $N_r$	10
额定功率 $P_N/\text{kW}$	3
额定电压 $U_N/\text{V}$	110
最大电感 $L_{\max}/\text{mH}$	35
最小电感 $L_{\min}/\text{mH}$	5
转动惯量 $J/(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$	0.0015
摩擦系数 $B/(\text{N}\cdot\text{m}/\text{rd}/\text{s})^{-1}$	0.0813

图 7 给出了风速  $v=3\text{ m/s}$ 、 $4\text{ m/s}$ 、 $5\text{ m/s}$  相对应的风力机功率—转速特性。从图中可以看出, 与风速  $3\text{ m/s}$ 、 $4\text{ m/s}$ 、 $5\text{ m/s}$  相对应的风力机最佳角速度和最大输出功率分别  $n_1=114.6\text{ r/min}$  和  $P_{a1}=105.8\text{ W}$ ,  $n_2=148.7\text{ r/min}$  和  $P_{a2}=300\text{ W}$ ,  $n_3=175.6\text{ r/min}$  和  $P_{a3}=578\text{ W}$ 。

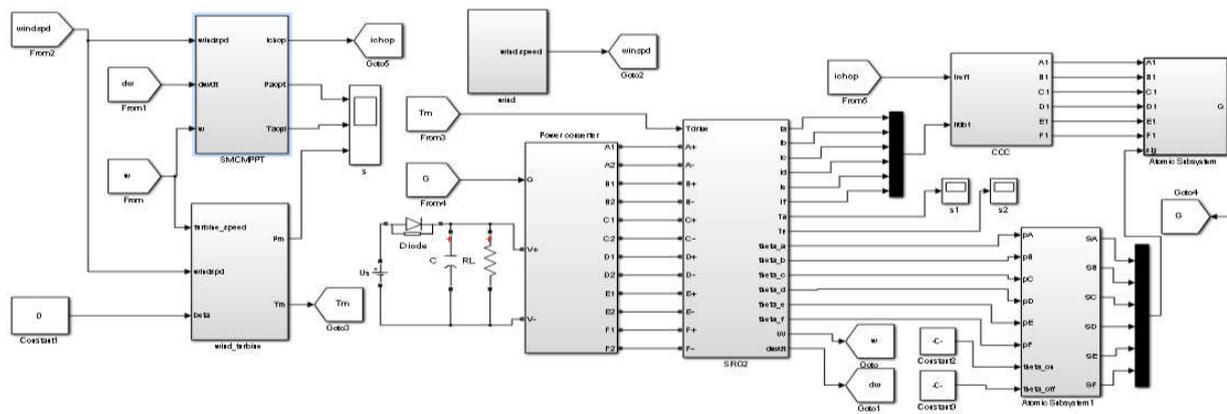


图 6 SRG 风力发电系统模型

Fig. 6 SRG wind power system model

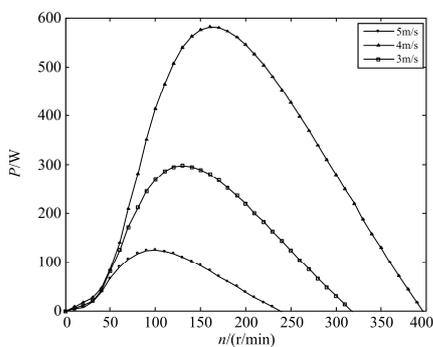


图 7 风力机功率-转速特性曲线

Fig. 7 Power-speed characteristic-curve of the wind turbine

图 8 给出了试验采取的风速曲线。试验采取阶跃风模拟风速变化时, 对系统的最大功率跟踪性能进行仿真分析与验证。初始风速为  $4\text{ m/s}$ ,  $0.3\text{ s}$  时增大到  $5\text{ m/s}$ ,  $0.7\text{ s}$  时风速降为  $3\text{ m/s}$ 。

图 9 给出了 PI 转速闭环控制下的 SRG 实际转速跟踪曲线。从图中可知  $t=0.1\text{ s}$  时转速跟踪到参考值, 当风速变化时, 转速能够较好地实现跟踪。

图 10 和图 11 给出了风速  $5\text{ m/s}$  时, PI 控制下的六相电流波形以及电磁转矩波形。从图中可以看出传统 PI 控制策略下的 CCC 的电磁转矩存在较大的脉动, 在工程实现中会产生较大的振动, 稳态精度较差。图 12—图 14 根据式(35)、式(36)设计的垂直轴 SRG 风力发电系统在滑模自适应控制下转速跟踪波形以及风速  $5\text{ m/s}$  稳定时的六相电流波形、电磁转矩波形局部波形。与传统 PI 控制对比, 滑模自适应控制下的转速跟踪时间  $0.05\text{ s}$  快于 PI 下的  $0.1\text{ s}$ , 具有几乎无超调、脉动小和跟踪精度高特点, 并且通过不同控制策略下的相电流、电磁转矩对比可以看出采用滑模自适应控制明显改变了相电流波形, 有效地降低了电磁转矩脉动, 体现了滑模控制的优越性。

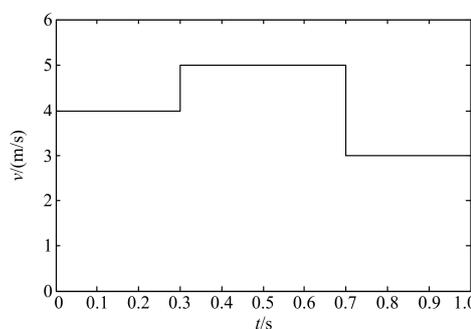


图 8 风速曲线

Fig. 8 Wind speed curve

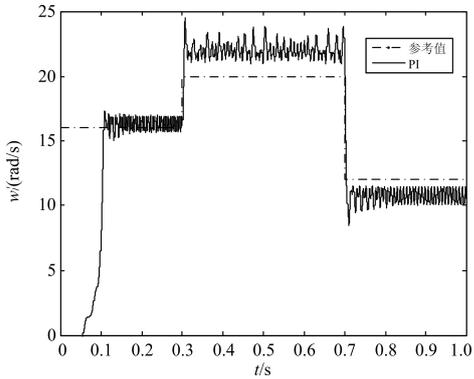


图 9 PI 控制下的转速跟踪曲线

Fig. 9 Speed tracking curve under the PI control

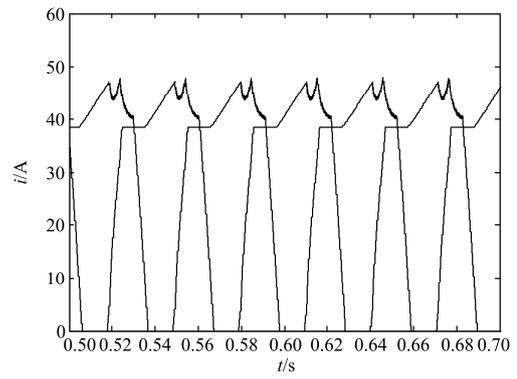


图 13 SMC 控制下的六相电流波形

Fig. 13 Six phase current waveform under the SMC control

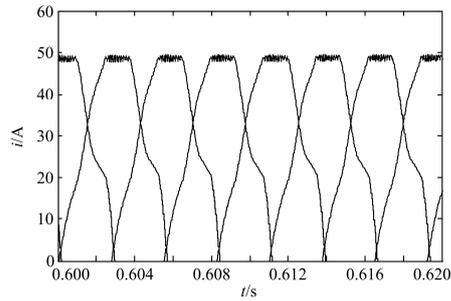


图 10 PI 控制下的六相电流波形

Fig. 10 Six phase current waveform under the PI control

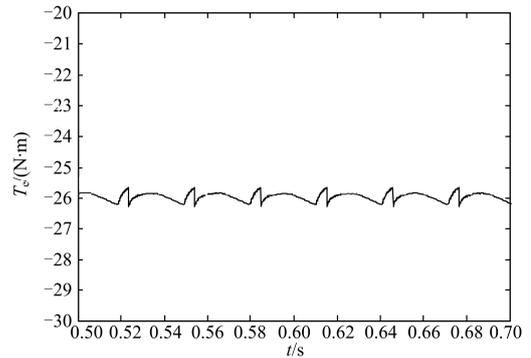


图 14 SMC 控制下的电磁转矩

Fig. 14 Electromagnetic torque under the SMC control

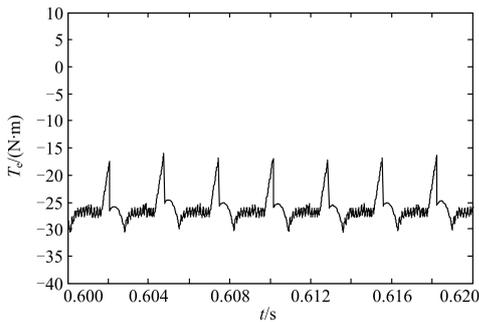


图 11 PI 控制下的电磁转矩

Fig. 11 Electromagnetic torque under the PI control

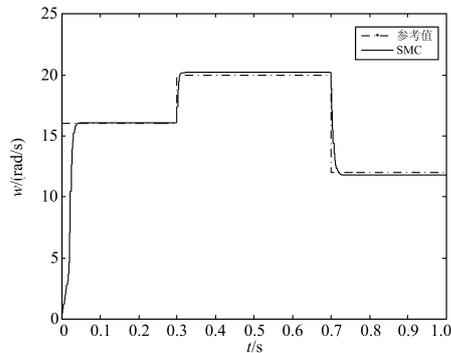


图 12 SMC 控制下转速跟踪曲线

Fig. 12 Speed tracking curve under SMC control

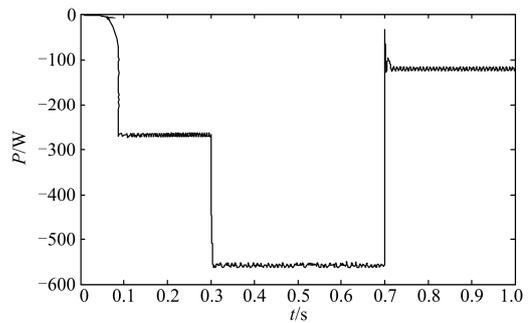
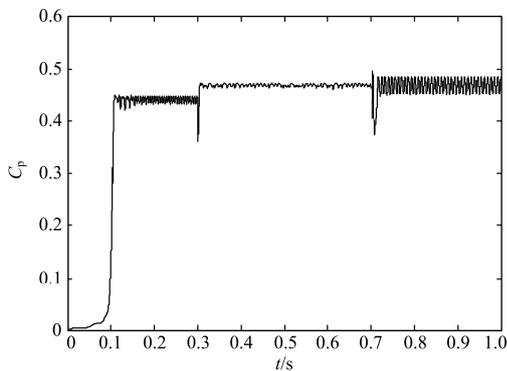
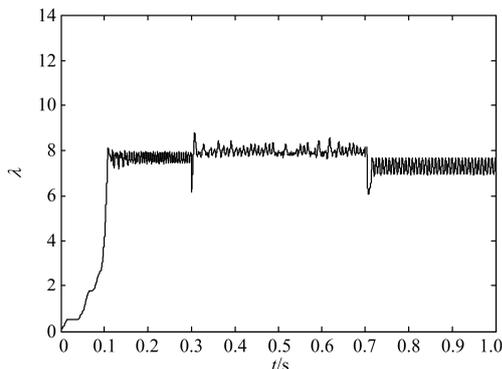


图 15 风速变化时, SMC 控制下的 SRG 输出平均电磁功率曲线

Fig. 15 Average electromagnetic power curve of SRG output under SMC control when wind speed changes

图 16 风速变化时, 风能利用系数  $C_p$  曲线Fig. 16 Wind energy utilization coefficient  $C_p$  curve when wind speed changes图 17 风速变化时, 叶尖速比  $\lambda$  曲线Fig. 17 Tip speed ratio curve of  $\lambda$  when wind speed changes

从图中可以看出当风速变化时, 两个参数基本上稳定在理论值  $C_{pmax}=0.48$ 、 $\lambda_{opt}=8.0$  附近, 说明系统能够基于最佳叶尖速比实现最大功率跟踪。

#### 4 结语

利用开关磁阻电机能够实现四象限运行的特点, 实现风力发电最大功率跟踪已成为国内外各相关高校研究的一个热点, 但是 SRG 在运行过程中存在因换相、扰动等引起的转矩脉动, 传统的 PI 控制造成输出功率稳定性差, 而滑模控制作为一种独立的智能控制算法, 对控制对象的是否线性并无要求, 适应性较好, 已被广泛应用在其他传统电机控制中。

本文对开关磁阻风力发电系统 MPPT 滑模控制器设计进行了研究, 基于 Simulink 建立了 SRG 风力发电系统 MPPT 控制系统模型, 对不同风速阶跃变化时进行了仿真实验, 实验结果说明所设计的控制器能使 SRG 风力发电系统以良好的动态性能实现 MPPT, 可以为高性能 SRG 控制器设计开发具有理论意义和实用价值。

#### 参考文献

- [1] 熊立新, 徐丙垠, 高厚磊, 等. 一种开关磁阻风力发电机最大风能跟踪方法[J]. 电工技术学报, 2009, 24(11): 1-6.  
XIONG Lixin, XU Bingyin, GAO Houlei, et al. A switched reluctance wind turbine maximum wind power tracking method[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(11): 1-6.
- [2] BARAZARTE R Y, GONZÁLEZ G G, HALL E. Comparison of electric generators used for wind generation[J]. IEEE Latin America Transactions, 2012, 7(9): 1040-1044.
- [3] LI Zhi, YE Lin, ZHAO Yongning, et al. Short-term wind power prediction based on extreme learning machine with error correction[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1: 8pp.  
DOI 10.1186/s41601-016-0016-y
- [4] 阮春长, 王宏华, 阮曰鱼. 基于模糊控制的开关磁阻风力发电系统最大功率点跟踪控制[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(5): 129-132.  
YUAN Chunchang, WANG Honghua, RUAN Yueyu. The switched reluctance wind power system based on fuzzy control of maximum power point tracking control[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(5): 129-132.
- [5] 熊立新, 高厚磊, 徐丙垠, 等. 开关磁阻发电机最大输出功率的控制原则[J]. 电机与控制学报, 2009, 13(2): 250-254.  
XIONG Lixin, GAO Houlei, XU Bingyin, et al. Switched reluctance generator of maximum output power control principle[J]. Electric Machines and Control, 2009, 13(2): 250-254.
- [6] 彭寒梅, 易灵芝, 邓文浪. 用于小型风力发电的 SRG 建模与控制[J]. 微特电机, 2010, 38(5): 70-73.  
PENG Hanmei, YI Lingzhi, DENG Wenlang. SRG modeling and control for small wind power generation[J]. Small and Special Electrical Machines, 2010, 38(5): 70-73.
- [7] 孙鑫, 赵德安, 田传帮. 开关磁阻风力发电系统最大功率追踪控制策略研究[J]. 微特电机, 2008, 36(10): 42-44.  
SUN Xin, ZHAO Dean, TIAN Chuanbang. Research on maximum power tracking control strategy of switched reluctance wind power generation system[J]. Small and Special Electrical Machines, 2008, 36(10): 42-44.

[8] 黄翌, 程江州, 万钧力. SRG 风力发电系统最大功率跟踪控制研究[J]. 电源技术, 2016, 40(1): 162-165.  
HUANG Zhao, CHENG Jiangzhou, WAN Junli. Research on maximum power tracking control of SRG wind power generation system[J]. Power Supply Technology, 2016, 40(1): 162-165.

[9] 邓君, 詹琼华, 孙剑波. 开关磁阻电机滑模变结构速度控制[J]. 微电机, 2006, 39(7): 1-4.  
DENG Jun, ZHAN Qionghua, SUN Jianbo. Sliding variable structure control speed of switched reluctance motor[J]. Micromotors, 2006, 39(7): 1-4.

[10] 肖蕙蕙, 李山. 开关磁阻电机的智能滑模控制[J]. 重庆大学学报, 2002, 25(10): 81-83.  
XIAO Huihui, LI Shan. Intelligent sliding mode control of Switched reluctance motor[J]. Journal of Chongqing University, 2002, 25(10): 81-83.

[11] SAHOO S K, PANDA S K, XU J X. Direct torque controller for switched reluctance drive using sliding mode control[C] // International Conference on Power Electronics and Drives Systems, 2005, 2: 1129-1134.

[12] SUN Yaning, WANG Weiping, QIAO Dengpan. Study on switch reluctance motor drive system using variable structure control with sliding[C] // IEEE International Conference on Information & Automation, 2010, 6: 2154-2157.

[13] LI Yan, TANG Yi, CHANG Jibin, et al. Continuous sliding mode control and simulation of SRM[C] // IEEE International Conference on Cognitive Informatics & Cognitive Computing, 2011: 314-317.

[14] 胡宝颖. 开关磁阻风力发电系统功率闭环控制的研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2012.  
HU Baoying. Research on power closed loop control of switched reluctance wind power system[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2012.

[15] 茅靖峰, 吴爱华, 吴国庆, 等. 基于扩张状态观测的永磁直驱风力发电系统 MPPT 自适应滑模控制[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(18): 58-64.  
MAO Jingfeng, WU Aihua, WU Guoqing, et al. Extended state observer MPPT permanent magnet direct drive wind power generation system based on adaptive sliding mode control[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(18): 58-64.

[16] 李咸善, 徐浩, 杜于龙. 采用叶尖速比法和爬山搜索法相结合的风力发电系统最大功率点跟踪研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(13): 66-70.  
LI Xianshan, XU Hao, DU Yulong. Maximum power tracking of wind power generation system using the combination of tip speed ratio method and climbing search method[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(13): 66-70.

[17] 刘丹, 李强, 冯承超. 小型直驱式永磁同步风力发电机快速最大功率追踪仿真研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(5): 142-145.  
LIU Dan, LI Qiang, FENG Chengchao. A simulation study of small direct drive permanent magnet synchronous generator fast maximum power tracking[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(5): 142-145.

[18] 陈志梅, 王贞艳, 张井岗. 滑模变结构控制理论及应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2012.

[19] 赵晗彤, 张建成. 基于滑模控制的储能稳定光伏微网离网运行母线电压策略的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(16): 36-42.  
ZHAO Hantong, ZHANG Jiancheng. Research on bus voltage control strategy of off-grid PV microgrid with flywheel energy storage system based on sliding mode control[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(16): 36-42.

[20] 李墨翰, 李玉忍. 基于滑模变结构的开关磁阻电机控制仿真[J]. 计算机仿真, 2009, 26(12): 351-354.  
LI Mohan, LI Yuren. Switched reluctance motor control simulation based on VSS[J]. Computer Simulation, 2009, 26(12): 351-354.

收稿日期: 2016-10-09; 修回日期: 2016-12-19

作者简介:

谭 阳(1991—), 男, 主要从事垂直轴开关磁阻风力发电电机控制方面的研究; E-mail: tanyang709671005@163.com

吴国庆(1957—), 男, 通信作者, 博士生导师, 主要从事磁悬浮支承技术和先进机械制造、风力发电技术方面的研究; E-mail: Wgq.ntu.edu.cn

茅靖峰(1976—), 男, 主要从事风力发电、电机及其控制技术方面的研究。E-mail: ntmjff@163.com

(编辑 张爱琴)