

文章编号:1000-582X(2011)07-057-06

# 永磁同步风力发电机转矩动态滑模控制器设计

胡雪松, 孙才新, 廖勇, 庄凯

(重庆大学 输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室, 重庆 400044)

**摘要:**考虑到永磁同步风力发电机的多变量、非线性及强耦合等特性,以及发电机的参数变化会对矢量控制性能产生影响,设计了针对风电应用的永磁同步风力发电机转矩动态滑模控制器。该一阶动态滑模控制器将常规变结构控制中的切换函数通过微分环节构成新的切换函数,有效降低了抖振。仿真验证表明,功率外环采用动态滑模控制器的永磁同步发电机矢量控制系统能够精确跟踪有功功率给定,并具有对电机参数及扰动不灵敏、鲁棒性好的优点。

**关键词:**风力发电;永磁同步发电机;滑模控制;抖振;鲁棒性

中图分类号:TM614

文献标志码:A

## The design of torque dynamic sliding mode controller in permanent magnet synchronous generator for wind turbine

HU Xue-song, SUN Cai-xin, LIAO Yong, ZHUANG Kai

(State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China)

**Abstract:** Permanent magnet synchronous generator for wind turbine is a multivariable nonlinear system with strong coupling. Considering the influence of the volatile parameters of the generator on the performance of vector control, the torque dynamic sliding-mode control strategy is further studied. The proposed first order dynamic sliding-mode control strategy reduces the chattering by using a new switch function constituted with derivative element. With the dynamic sliding-mode controller in the power outer loop, the PMSG vector control system shows excellent robustness and insensitivity to the parameters and disturbance, which is confirmed by simulation.

**Key words:** wind power; permanent magnet synchronous generator; sliding mode control; chattering; robustness

直驱风电机组采用永磁同步发电机,从而省去了齿轮箱、滑环和电刷等薄弱环节,使系统整体运行效率和可靠性都显著提高。因此,永磁同步风电机组近年来得到了国内外科研人员的广泛关注,成为了目前风力发电领域的重要发展方向<sup>[1-4]</sup>。

矢量控制策略多被应用于永磁同步发电机控制系统,以改善系统的动态特性,从而实现高性能的控制<sup>[5-6]</sup>。但是,由于矢量控制策略是建立在电机精确

数学模型基础上的,不可避免地要受到电机参数变化的影响,从而导致系统控制性能的下降;另外,矢量控制策略通常采用传统PID控制技术,其控制参数的选择对系统性能有很大的影响。当发电机运行过程中电机某些参数发生变化时,PID控制器不能及时调整自身的控制参数,表现出较差的参数自适应性<sup>[7-8]</sup>。

滑模变结构控制系统因其具有快速响应、对系

收稿日期:2011-02-10

基金项目:重庆市自然科学基金资助项目(CSTC2006BB6216)

作者简介:胡雪松(1972-),男,重庆大学博士,主要从事电机及其控制研究,(E-mail)huxs@cqu.edu.cn。

统参数变化不敏感、设计简单和易于实现等优良特性而在风电系统中得到了应用<sup>[9-14]</sup>。文献[13]针对感应发电机系统以功率相对误差作为切换面,对两种模态分别采取不同的滑模控制结构,实现了在风速扰动和不确定机械、电气参数条件下频率的无差跟踪和风能最大捕获。但是,滑模控制存在切换抖振,会对风力机械设备造成冲击。文献[14]以转矩为控制信号,采用积分型滑动模态控制律,有效地解决了滑模面的切换抖振。

笔者结合滑模变结构控制的特点,设计了一阶动态滑模控制器来控制直驱永磁同步风力发电机的电磁转矩,并通过仿真对其控制性能进行了验证。结果表明,将滑模控制应用到永磁同步发电系统的矢量控制中,既能使系统具有良好的动态性能,又能克服系统参数变化、非线性等因素的影响,提高系统的鲁棒性。

## 1 永磁同步发电机模型及控制方案

永磁同步风力发电机一般采用转子磁场定向的矢量控制技术。

设  $d$ - $q$  轴系以转子速度旋转,  $q$  轴超前  $d$  轴  $90^\circ$ 。如果  $d$  轴位于转子磁链方向,则可得电机的定子电压方程为<sup>[15]</sup>

$$\begin{cases} u_{sd} = R_s i_{sd} + L_s \frac{di_{sd}}{dt} - \omega L_s i_{sq} \\ u_{sq} = R_s i_{sq} + L_s \frac{di_{sq}}{dt} + \omega L_s i_{sd} + \omega \Psi \end{cases}, \quad (1)$$

式中:  $u_{sd}$ 、 $u_{sq}$  分别为定子电压的  $d$ 、 $q$  轴分量;  $R_s$  为定子电阻;  $L_s$  为定子电感;  $i_{sd}$ 、 $i_{sq}$  分别为定子电流的  $d$ 、 $q$  轴分量;  $\omega$  为转子的角速度;  $\Psi$  为转子磁链。

按  $i_{sd} = 0$  控制时,电机的电磁转矩为

$$T_e = p \Psi i_{sq}, \quad (2)$$

式中:  $p$  为电机极对数。

忽略机械损耗与附加损耗后的发电机功率平衡关系为

$$P_s = P_e - P_{Cu}, \quad (3)$$

式中:  $P_s$  为发电机输出的有功功率;  $P_e$  为电磁功率;  $P_{Cu}$  为定子铜耗。

电磁功率与电磁转矩之间的关系为

$$P_e = T_e \omega. \quad (4)$$

由式(1)可知,由于定子  $d$ 、 $q$  轴电流不但受到各自控制电压  $u_{sd}$ 、 $u_{sq}$  的影响,还分别受到交叉耦合电压  $-\omega L_s i_{sq}$ 、 $\omega L_s i_{sd} + \omega \Psi$  的影响。因此,在电机的电

环控制中,除了要对  $d$ 、 $q$  轴电流分别进行闭环 PI 控制得到相应的控制电压分量以外,还要分别加上交叉耦合电压的补偿项  $-\omega L_s i_{sq}$  和  $\omega L_s i_{sd} + \omega \Psi$ , 最终得到  $d$ 、 $q$  轴控制电压  $u_{sd}$  和  $u_{sq}$ 。

由式(3)-(4)可知,在电机转速  $\omega$  保持不变的情况下,通过控制  $q$  轴电流分量,就能控制电机的电磁转矩,进一步控制电机输出的有功功率。

由于在电网侧变流器的控制中要保持直流侧电压恒定,因此直流侧电容在运行过程中充放电功率很小。如果进一步忽略变流器本身的功率损耗,可以认为发电机输出的有功功率流经两侧 PWM 变流器后将会被全部送入电网。因此,可以通过测量网侧变流器输入电网的有功功率  $P_g$  来近似获得发电机输出的有功功率。从而,采用传统 PI 控制时,电机侧变流器的控制框图如图 1 所示。

## 2 滑模变结构控制

### 2.1 基本描述

设有一控制系统:

$$\begin{cases} \dot{x} = f(x, u, t) & x \in R^n, u \in R^m, t \in R \\ y = h(x) & y \in R^l, n \geq m \geq l \end{cases}, \quad (5)$$

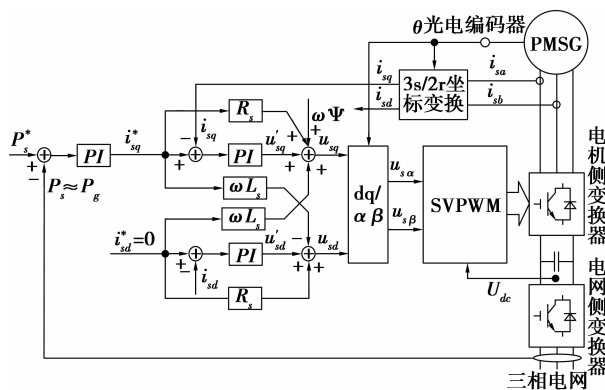


图 1 电机侧变流器的控制框图

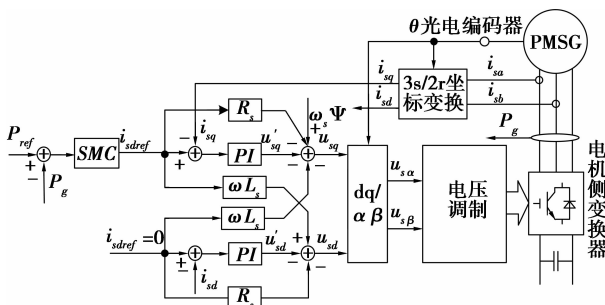


图 2 永磁同步发电机采用滑模控制器的功率调节框图

需要确定切换函数  $S(x)$  ( $S \in R^m$ ), 并寻求变结构控制函数

$$u = \begin{cases} u^+(x) & S(x) > 0 \\ u^-(x) & S(x) < 0 \end{cases}, \quad (6)$$

式中:  $u^+(x) \neq u^-(x)$ , 并使得

- 1) 滑动模态存在;
- 2) 满足能达性条件: 在切换面  $S(x)=0$  以外的状态点都将在有限时间内达到切换面;
- 3) 滑模运动具有稳定性。

### 2.2 设计步骤

滑模变结构控制器设计的基本步骤分为以下 2 步:

1) 设计切换函数  $S(x)$ 。切换函数的选择直接决定滑动模态稳定性与品质。一般按稳定条件选择切换面。对于单输入的情况, 取滑模切换函数为

$$S(x) = \sum_{i=1}^{n-1} c_i x_i + x_n, \quad (7)$$

其中  $x_i = x^{(i-1)}$  ( $i=1, 2, \dots, n$ ) 为系统状态及其各阶导数。需要正确选取常数  $c_1, c_2, \dots, c_{n-1}$ , 使得多项式  $p^{n-1} + c_{n-1} p^{n-2} + \dots + c_2 p + c_1$  为霍尔维茨 (Hurwitz) 稳定,  $p$  为 Laplace 算子。

2) 求取滑动模态控制律  $u^\pm(x)$ 。滑模变结构的基本控制策略有常值切换控制、函数切换控制和比例切换控制 3 种控制方式。

一旦切换函数  $S(x)$  和滑动模态控制律  $u^\pm(x)$  都得到了, 滑动模态控制系统就能完全建立起来。

## 3 动态滑模控制器设计

在图 1 的方案中, 系统外环按传统方式采用 PI 控制, 其输出作为电机  $q$  轴电流分量的给定值, 通过有功功率、电流双闭环来实现发电机输出有功功率的调节。该方案是以经典控制理论为基础的, 对于非线性、强耦合、参数易变的风力发电系统来说, 其实际效果远远达不到理论结果。因此, 笔者采用功率外环滑模变结构控制器, 系统控制框图如图 2 所示。

由于传统的滑模控制方法中切换函数一般只依赖于系统状态, 与控制输入无关, 不连续项会直接转移到控制器中, 这样容易引起系统抖振<sup>[16]</sup>。故设计了一阶动态滑模控制器, 将常规变结构控制中的切换函数通过微分环节构成新的切换函数, 该切换函数与系统控制输入的一阶或高阶导数有关, 从而将不连续项转移到控制的一阶或高阶导数中去, 得到在时间上本质连续的动态滑模控制律, 从而可有效地降低抖振。

该系统控制目标为发电机输出有功功率  $P_g$  能够精确跟踪给定有功功率  $P_{ref}$ , 故定义滑模控制器的切换函数为

$$S = P_{ref} - P_g. \quad (8)$$

切换函数导数为

$$\dot{S} = \dot{P}_{ref} - \dot{P}_g = \dot{P}_{ref} - \dot{T}_e \omega - T_e \dot{\omega}, \quad (9)$$

选取以下非线性动态函数使系统以恒速向滑模面  $S=0$  运动。

$$\dot{S} = -M \cdot \text{sign}(S), M > 0. \quad (10)$$

由式(9)和式(10)有

$$\dot{P}_{ref} - \dot{T}_e \omega - T_e \dot{\omega} = -M \cdot \text{sign}(S). \quad (11)$$

由式(11)可得以下动态方程。

$$\dot{T}_e = (\dot{P}_{ref} - T_e \dot{\omega} + M \cdot \text{sign}(S)) / \omega, \quad (12)$$

将式(2)代入式(12)可得

$$i_{sq} = -\frac{1}{p\Psi\omega} [\dot{P}_{ref} + \dot{\omega} p\Psi I_{sq} + M \text{sign}(S)]. \quad (13)$$

将式(13)积分后就得到发电机定子  $q$  轴电流的给定值  $i_{sqref}$ 。由式(8)-(13)得出的发电机动态滑模控制原理框图如图 3 所示。

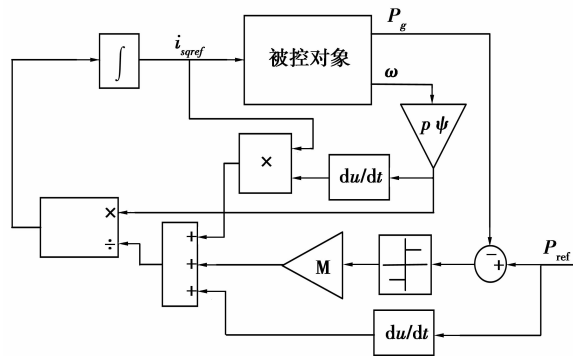


图 3 动态滑模控制器原理框图

## 4 仿真结果分析

为了验证所设计滑模控制器的性能, 下面从有功功率调节、与 PI 控制对比两个方面进行仿真分析。仿真模型中永磁同步发电机的参数见表 1。

表 1 永磁同步发电机的主要参数

电机参数	数值	电机参数	数值
电机极对数	28	$d$ 轴电感/mH	2.56
电机额定功率/kW	1 300	$q$ 轴电感/mH	2.56
额定频率/Hz	50	永磁体磁链/Wb	5.438 8
定子电阻/ $\Omega$	0.006		

#### 4.1 发电机有功功率调节性能仿真

图 4 为永磁同步发电机在电机参数准确的情况下,采用动态滑模控制器进行有功功率调节的仿真曲线。仿真过程中保持风速  $V$  为 12 m/s 不变,在 5 s 时发电机输出有功功率给定从 0.4 pu 阶跃到 0.6 pu。从仿真结果可以看出,采用动态滑模控制器的永磁同步发电机系统具有调节速度快、超调量小、无静差等优点,实现了发电机输出有功功率的快速准确调节。而且动态滑模控制器的输出  $i_{sqref}$  为一条连续变化的曲线,有效抑制了系统的抖振。

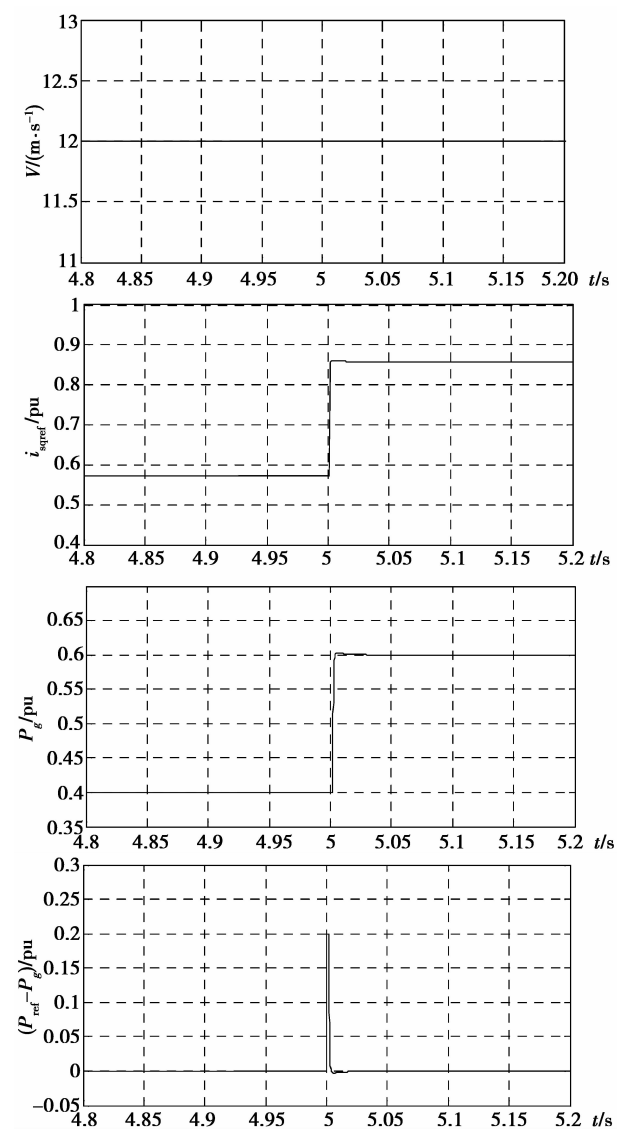
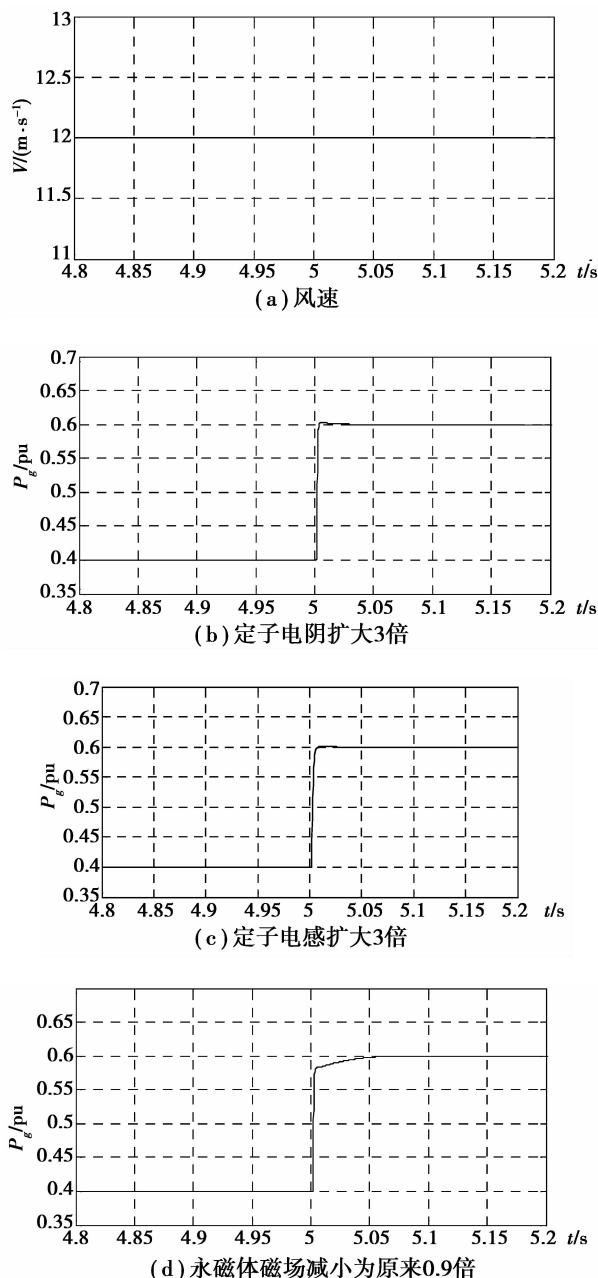


图 4 电机参数准确时有功功率调节曲线

图 5 为永磁同步发电机在电机参数变化的情况下,采用动态滑模控制器进行有功功率调节的仿真曲线。其中图 5(b)、(c)、(d)、(e)分别为电机定子电阻扩大 3 倍、电机定子电感扩大 3 倍、永磁体磁场减小

为原来的 90%、电机转子机械位置角有一  $6^\circ$  偏差时发电机输出有功功率曲线。仿真过程中保持风速  $V$  为 12 m/s 不变,在 5 s 时发电机输出有功功率给定从 0.4 pu 阶跃到 0.6 pu。

由于发电机采用转子磁场定向矢量控制策略,当电机定子电阻、定子电感、永磁体磁场以及转子机械位置角发生变化时,其  $d$  轴、 $q$  轴电流解耦控制效果会变差。而系统外环采用动态滑模控制器时,上述变化下发电机输出有功功率仍然能较好地跟踪给定功率曲线,说明笔者设计的动态滑模控制器具有对外界参数变化不敏感、抗干扰能力强的优点。



(d) 永磁体磁场减小为原来 0.9 倍

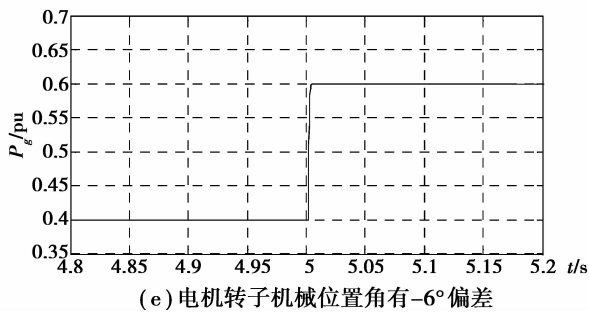


图5 电机参数变化时有功功率调节曲线

#### 4.2 动态滑模控制器与PI控制器仿真对比

图6为风速保持12 m/s不变,在10 s时发电机有功功率给定从0.4 pu阶跃到0.6 pu,两种控制策略的有功功率响应仿真对比曲线。图中实线为功率外环采用动态滑模控制器控制的有功功率响应曲线,虚线为功率外环采用传统PI控制器的有功功率响应曲线(下同)。图7为风速变化,发电机给定功率保持为0.4 pu,两种控制策略的有功功率响应仿真对比曲线。

从图6、图7的仿真结果可知,与PI控制器相比,功率外环采用动态滑模控制器的永磁同步发电机系统具有更快的有功功率响应能力,且调节过程中的超调量更小。外部风速变化时,动态滑模控制器的有功功率波动更小。因此基于动态滑模控制器的永磁同步发电机控制系统具有良好的动态调节能力和较强的鲁棒性。

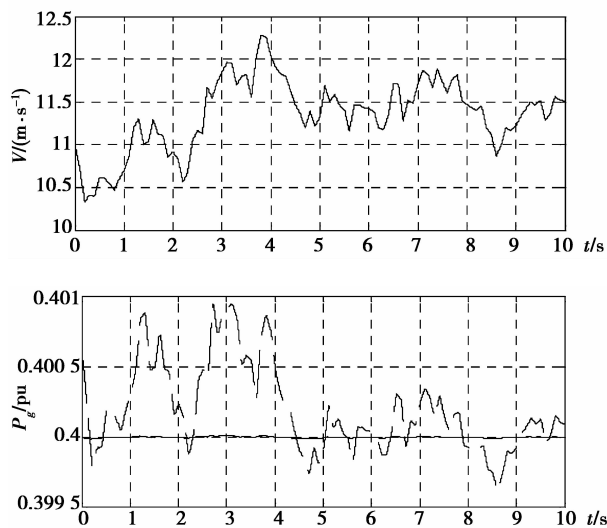


图7 两种控制策略的功率响应曲线(风速变化、给定功率不变)

### 5 结 语

利用滑模控制理论设计了一阶动态滑模控制器,建立了功率外环采用动态滑模控制器,电流内环采用PI控制器的永磁同步发电机矢量控制模型,对发电机的有功功率调节进行了仿真研究。仿真结果表明,基于动态滑模控制器的永磁同步发电机系统具有调节速度快、超调量小、控制精度高、对外部参数变化不敏感、鲁棒性强等优点。而且动态滑模控制器的输出为连续变化的量,有效地抑制了系统的抖振。

#### 参考文献:

[1] POLINDER H, VAN DER PUL F F A, DE VILDER G J. Comparison of direct-drive and geared generator concepts for wind turbines[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2006, 21(3): 725-732.

[2] KIM K C, LIM S B, JANG S G, et al. Analysis on the direct-driven high power permanent magnet generator for wind turbine[C]//The 8th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), September 27-29, 2005, Nanjing, China. [S. l.]: IEEE, 2006: 243-247.

[3] 徐锋, 王辉, 杨韬仪. 兆瓦级永磁直驱风力发电机组变流技术[J]. 电力自动化设备, 2007, 27(7): 57-61. XU FENG, WANG HUI, YANG TAO-YI. Research on power conversion technique in MW-level direct-driven wind turbine [J]. Electric Power Automation Equipment, 2007, 27(7): 57-61.

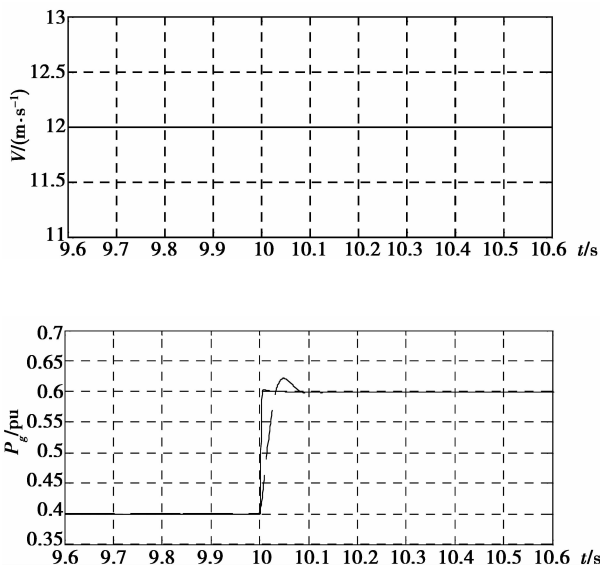


图6 两种控制策略的功率响应曲线(风速不变、给定功率阶跃)

- [4] 尹明,李庚银,张建成,等.直驱式永磁同步风力发电机组建模及其控制策略[J].电网技术,2007,31(15):61-65.
- [5] YIN MING, LI GENG-YIN, ZHANG JIAN-CHENG, et al. Modeling and control strategies of directly driven wind turbine with permanent magnet synchronous generator [J]. Power System Technology, 2007, 31(15):61-65.
- [6] CHINCHILLA M, ARNALTES S, BURGOS J C. Control of permanent-magnet generators applied to variable-speed wind-energy systems connected to the grid[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2006,21(1): 130-135.
- [7] 姚骏,廖勇,庄凯.永磁直驱风电机组的双PWM变换器协调控制策略[J].电力系统自动化,2008,32(20):88-92.  
YAO JUN, LIAO YONG, ZHUANG KAI. Coordinated control strategy of back-to-back PWM converter for permanent magnet direct-driven wind turbine [J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(20): 88-92.
- [8] 姚骏,廖勇.基于全模糊控制器的交流励磁发电机励磁控制系统研究[J].中国电机工程学报,2007,27(33):36-41.  
YAO JUN, LIAO YONG. Research of AC excited generator excitation control system based on full fuzzy controller[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(33): 36-41.
- [9] 赵永祥,夏长亮,宋战锋,等.变速恒频风力发电系统转速非线性PID控制[J].中国电机工程学报,2008,28(11):133-138.  
ZHAO YONG-XIANG, XIA CHANG-LIANG, SONG ZHAN-FENG, et al. Nonlinear PID rotating speed control of variable speed constant frequency wind turbine system [J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(11):133-138.
- [10] MATAS J, CASTILLA M, GUERRERO J M, et al. Feedback linearization of direct-drive synchronous wind-turbines via a sliding mode approach [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2008, 23(3): 1093-1103.
- [11] BELTRAN B, AHMED-ALI T, BENBOUZID M E H. Sliding mode power control of variable-speed wind energy conversion systems [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2008, 23(2): 551-558.
- [12] BELTRAN B, AHMED-ALI T, BENBOUZID M. High-order sliding mode control of variable speed wind turbines [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2009, 56(9): 3314-3321.
- [13] 杨俊华,吴捷.风力发电机组的非线性控制-变结构控制与鲁棒控制[J].动力工程,2003,23(6):2803-2809.  
YANG JUN-HUA, WU JIE. Application of nonlinear control techniques in wind energy conversion system: variable structure control and  $H_\infty$  robust control [J]. Power Engineering, 2003, 23(6): 2803-2809.
- [14] DE BATTISA H, MANTZ R J, CHRISTIANSEN C F. Dynamical sliding mode power control of wind driven induction generators [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2000, 5(4): 451-457.
- [15] PENA R, SBARBARO D. Integer variable structure controllers for small wind energy systems [C]// Proceedings of the 1999 IEE Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, November 29-December 3, 1999, California, USA. [S. l.]: IEEE, [2002-08-06]:1067-1072.
- [16] 廖勇,庄凯,姚骏,等.直驱式永磁同步风力发电机双模功率控制策略的仿真研究[J].中国电机工程学报,2009,29(33):76-82.  
LIAO YONG, ZHUANG KAI, YAO JUN, et al. Dual-mode power control strategy simulation study of direct-driven permanent magnet synchronous generator for wind turbine [J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(33):76-82.
- [17] 刘金琨.滑模变结构控制 MATLAB 仿真[M].北京:清华大学出版社,2002.

(编辑 王维朗)