

# 基于动态面控制的液压型风力发电机组稳速控制研究

艾超<sup>1,2</sup>, 闫桂山<sup>1</sup>, 孔祥东<sup>1,2</sup>, 董彦武<sup>1</sup>

(1. 燕山大学 河北省重型机械流体动力传输与控制实验室, 河北秦皇岛 066004;

2. 燕山大学 先进锻压成形技术与科学教育部重点实验室, 河北秦皇岛 066004)

**摘要:** 针对液压型风力发电机组液压调速系统稳速控制问题, 建立了风速、风力机特性数学模型和定量泵-变量马达液压调速系统的关键参数状态方程. 提出了一种基于动态面控制的稳速输出控制方法, 并对其控制律进行推导分析, 采用动态面控制原理对变量马达转速进行多闭环控制, 并对30 kVA 液压型风力发电机组进行了仿真和实验研究. 结果表明: 该方法具有较好的控制效果, 对风力机输入的时变性和不确定性具有良好的抑制作用, 实现了机组的稳速控制.

**关键词:** 风力发电机组; 液压传动; 稳速控制; 动态面控制

## Research on Steady Speed Control of Hydraulic Wind Turbines Based on Dynamic Surface Control

AI Chao<sup>1,2</sup>, YAN Guishan<sup>1</sup>, KONG Xiangdong<sup>1,2</sup>, DONG Yanwu<sup>1</sup>

(1. Hebei Provincial Key Laboratory of Heavy Machinery Fluid Power Transmission and Control, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, Hebei Province, China; 2. MOE's Key Laboratory of Advanced Forging & Stamping Technology and Science, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, Hebei Province, China)

**Abstract:** To achieve steady speed control of hydraulic governing system in hydraulic wind turbines, mathematical models were built up for the wind speed and wind turbine characteristics, while state equations were established for key parameters in the fixed displacement pump-variable displacement motor hydraulic governing system. A steady speed control method based on dynamic surface control was proposed, of which the control law was derived and analyzed, so as to realize multi-closed-loop control of the motor speed using dynamic surface control principles. The proposed control method was verified on the basis of a 30 kVA hydraulic wind turbine platform. Simulation and experimental results show that the control method based on dynamic surface control has good control effect, with good inhibiting functions on time-varying behavior and uncertainty of wind input, achieving steady speed control of the wind turbine.

**Key words:** wind turbine; hydraulic transmission; steady speed control; dynamic surface control

收稿日期: 2015-04-17 修订日期: 2015-05-28

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51475406, 51405423); 燕山大学青年教师自主研究计划课题资助项目(13LGB005)

作者简介: 艾超(1982—), 男, 河北唐山人, 讲师, 博士, 研究方向为液压型风力发电机组.

孔祥东(通信作者), 男, 教授, 博士, 电话(Tel.): 0335-8051166; E-mail: xdkong@ysu.edu.cn.

## 符号说明:

 $\Delta\omega$ ——风速频率间距,rad/s $\omega_i$ ——第*i*个分量角速度,rad/s $S_V(\omega_i)$ ——第*i*个分量的振幅,m $N$ ——风速统计总数 $\phi_i$ ——随机变量分布 $K_N$ ——地表粗糙系数 $F$ —— $[0,1]$ 内的数值 $u$ ——相对高度的平均风速,m/s $C_{um}$ ——变量马达泄漏系数, $m^3/(s \cdot Pa)$  $\omega_p$ ——定量泵角速度,rad/s $\omega_m$ ——变量马达角速度,rad/s $D_p$ ——定量泵排量, $m^3/\text{rad}$  $\gamma$ ——变量马达摆角 $P$ ——风力机输出功率,W $\omega$ ——风力机角速度,rad/s $V_0$ ——单个腔室的总容积, $m^3$  $p_h$ ——系统压力,Pa $R$ ——风力机叶片半径,m $\beta_c$ ——有效体积弹性模量,Pa $T_e$ ——变量马达负载转矩, $N \cdot m$  $B_m$ ——变量马达黏性阻尼系数, $N \cdot s/m$  $J_m$ ——变量马达和负载的总惯量, $kg \cdot m^2$  $K_m$ ——变量马达排量梯度, $m^3/\text{rad}$  $v$ ——随机风速,m/s $T_v$ ——风力机输出转矩, $N \cdot m$  $C_t$ ——总泄漏系数, $m^3/(s \cdot Pa)$  $J_p$ ——定量泵和负载的总惯量, $kg \cdot m^2$  $q_{V,p}$ ——定量泵体积流量, $m^3/s$  $q_{V,m}$ ——变量马达体积流量, $m^3/s$  $\rho$ ——空气气流密度, $kg/m^3$  $C_{tp}$ ——定量泵泄漏系数, $m^3/(s \cdot Pa)$  $\omega_{md}$ ——变量马达的参考转速,rad/s $\tau_1$ ——系统压力参考信号滤波时间常数,s $C_p(\lambda, \beta)$ ——风能利用系数 $B_p$ ——定量泵黏性阻尼系数, $N \cdot s/m$  $D_m$ ——变量马达排量, $m^3/\text{rad}$  $p_{hd}$ ——系统参考压力,Pa

液压型风力发电机组<sup>[1-3]</sup>采用液压传动系统实现风力机到发电机之间的能量传输,有效地提高了发电质量,降低了机舱的重量,缓解了对电网的冲击。其中,风能作为该机组的能量输入,具有蕴藏量丰富、可再生、分布广和无污染等特点<sup>[4]</sup>,有效提高了风力发电机组的经济效益和环保效益,为机组的工程推广奠定了良好的基础。

然而风能作为一种不稳定的动力源,具有间歇性和不完全可控性<sup>[5-6]</sup>,直接导致风力发电机组输入能量的随机波动。风能的上述特点为机组并网稳速控制带来了一定的挑战。液压型风力发电机组在并网过程中,首先要求发电机保持稳速输出。因此,风力发电机组稳速控制是决定其并网的关键技术要求,是风力发电技术的一个重要研究方向。

国内外学者对液压型风力发电机组稳速控制进行了一系列研究。卞永明等<sup>[7]</sup>提出采用蓄能器对液压系统中的压力波动进行平抑控制,实现机组稳速控制;艾超等<sup>[8]</sup>在液压型风力发电机组稳定转速附近提出了一种小信号线性化抗干扰控制方式,可用于机组稳速控制;石茂顺等<sup>[9]</sup>采用液压变压器原理对发电机输出转速进行控制,通过液压变压器的调压原理,实现发电机的稳速控制。

在液压型风力发电机组中,稳速控制主要受风力机输入的时变性和不确定性以及负载扰动等因素的影响。因此,针对液压型风力发电机组稳速控制问题,笔者提出一种基于动态面控制的稳速输出控制方法,并对其控制律进行推导分析,通过动态面控制原理实现机组的稳速控制。

## 1 液压型风力发电机组

### 1.1 机组工作原理

液压型风力发电机组主要由风力机、定量泵-变

量马达液压传动系统和同步发电机等组成<sup>[10]</sup>,其工作原理如图1所示。

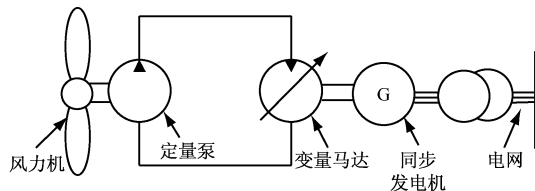


图1 液压型风力发电机组工作原理

Fig. 1 Working principle of the hydraulic wind turbine

图1中风力机与定量泵同轴相连,风能驱动定量泵旋转输出高压油,高压油经液压管路后驱动变量马达旋转,变量马达与发电机同轴相连,同步发电机在变量马达作用下实现并网发电。机组通过调整变量马达摆角,对变量马达的转速进行实时控制。

本文所阐述的液压型风力发电机组稳速控制具体指发电机稳定于同步转速。考虑到变量马达与同步发电机同轴相连,机组稳速控制即为变量马达(同步发电机)保持同步转速不变,进而使同步发电机稳速并网运行。

### 1.2 并网对机组稳速控制的要求

为保证风力发电机组并网运行,Q/GDW 392—2009《风电场接入电网技术规定》<sup>[11]</sup>要求发电机频率与电网频率一致,两者频率偏差不超过 $\pm 0.2 \text{ Hz}$ ( $0.4\%$ )。

针对液压型风力发电机组,在风力机波动输入和外部负载扰动作用下,需要控制变量马达(发电机)转速稳定于同步转速 $1500 \text{ r/min}$ ,其转速偏差不超过 $\pm 6 \text{ r/min}$ 。

## 2 数学模型

为实现液压型风力发电机组的稳速控制,首先

需对机组的关键部件(风力机、定量泵和变量马达等)进行数学模型分析。

#### (1) 风速.

风速是不可控因素,具有随机性和间歇性.采用随机风模型<sup>[12]</sup>对风速进行建模分析,采用随机噪声成分来表示风速的随机性:

$$\begin{cases} v = 2 \sum_{i=1}^N [S_V(\omega_i) \Delta\omega]^{1/2} \cos(\omega_i + \phi_i) \\ \omega_i = (i - 1/2) \cdot \Delta\omega \\ S_V(\omega_i) = \frac{2K_N F^2 \omega_i}{\pi^2 [1 + (F\omega_i/u\pi)^2]^{4/3}} \end{cases} \quad (1)$$

#### (2) 风力机.

风力机是整个系统的能量捕获机构,同时风力机能量的波动输入对机组稳速控制产生一定的影响.对风力机的输出功率和转矩进行数学模型<sup>[13]</sup>分析,则有

$$\begin{cases} P = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 v^3 C_P(\lambda, \beta) \\ T_v = \frac{P}{\omega} \end{cases} \quad (2)$$

#### (3) 定量泵.

定量泵在风力机作用下输出高压油,其体积流量连续性方程为

$$q_{V,p} = D_p \omega_p - C_{tp} p_h \quad (3)$$

定量泵与风力机同轴旋转,其力矩平衡方程为

$$T_v - D_p p_h = J_p \frac{d\omega_p}{dt} + B_p \omega_p \quad (4)$$

定量泵角速度的状态方程为

$$\dot{\omega}_p = \frac{1}{J_p} (T_v - D_p p_h - B_p \omega_p) \quad (5)$$

#### (4) 变量马达.

定量泵输出高压油到变量马达,变量马达体积流量连续性方程为

$$q_{V,m} = D_m \omega_m + C_{tm} p_h = K_m \gamma \omega_m + C_{tm} p_h \quad (6)$$

变量马达同轴驱动发电机旋转,其力矩平衡方程为

$$D_m p_h - T_e = J_m \frac{d\omega_m}{dt} + B_m \omega_m \quad (7)$$

由式(6)和式(7)可知,变量马达角速度的状态方程为

$$\dot{\omega}_m = \frac{1}{J_m} (K_m \gamma p_h - B_m \omega_m - T_e) \quad (8)$$

#### (5) 高压管路.

定量泵到变量马达间的高压管路由于油液压缩性,产生的体积流量为

$$q_{V,p} - q_{V,m} = \frac{V_0}{\beta_e} \frac{dp_h}{dt} \quad (9)$$

系统压力状态方程为

$$\dot{p}_h = \frac{\beta_e}{V_0} (D_p \omega_p - C_t p_h - K_m \gamma \omega_m) \quad (10)$$

### 3 动态面控制

为实现机组稳速控制,提出了基于动态面控制<sup>[14]</sup>的稳速输出控制方法,该方法基于反步法的设计思想,在虚拟控制过程中引入一阶滤波器,从而获得了另一个控制变量,有效避免了后推法在设计过程中的“微分项爆炸”现象<sup>[15]</sup>,具体设计步骤如下.

由以上分析可知,机组稳速控制的实质是对变量马达转速的控制,因此可根据变量马达的转速及其参考输入定义第一个动态面为

$$S_1 = \omega_m - \omega_{md} \quad (11)$$

将式(8)代入式(11)并求导可得

$$\dot{S}_1 = \frac{1}{J_m} (K_m \gamma p_h - B_m \omega_m - T_e) - \dot{\omega}_{md} \quad (12)$$

选择动态面  $S_1$  的 Lyapunov 函数为  $V_1 = S_1^2 / 2$ , 当  $\dot{S}_1 = -k_1 S_1$  ( $k_1 > 0$ ) 时, 动态面  $S_1$  收敛, 其中  $k_1$  为动态面  $S_1$  的收敛系数.

动态面  $S_1$  的实质是跟踪期望轨迹  $\omega_{md}$  的误差, 于是可以取系统压力为虚拟控制信号, 使得  $S_1 \rightarrow 0$ . 由式(12)可知, 虚拟控制信号为

$$\bar{p}_h = \frac{(-k_1 S_1 + \dot{\omega}_{md}) J_m + B_m \omega_m + T_e}{K_m \gamma} \quad (13)$$

为了避免虚拟控制信号在连续求导中产生大量的微分项, 对  $\bar{p}_h$  进行一阶低通滤波, 可以得到系统压力的参考信号为

$$\tau_1 \dot{p}_{hd} + p_{hd} = \bar{p}_h \quad (14)$$

根据系统压力及其参考信号, 定义第二个动态面为

$$S_2 = p_h - p_{hd} \quad (15)$$

将式(10)代入式(15)并求导可得

$$\dot{S}_2 = \frac{\beta_e}{V_0} (D_p \omega_p - C_t p_h - K_m \gamma \omega_m) - \dot{p}_{hd} \quad (16)$$

选择动态面  $S_2$  的 Lyapunov 函数为  $V_2 = S_2^2 / 2$ , 当  $\dot{S}_2 = -k_2 S_2$  ( $k_2 > 0$ ) 时, 动态面  $S_2$  收敛, 其中  $k_2$  为动态面  $S_2$  的收敛系数.

由式(16)可以得到系统的控制输入, 即变量马达摆角给定为

$$\gamma = \frac{D_p \omega_p - C_t p_h - (-k_2 S_2 + \dot{p}_{hd}) \frac{V_0}{\beta_e}}{K_m \omega_m} \quad (17)$$

通过进一步分析可知, 动态面控制器由式(11)和式(15)的动态面、式(13)的虚拟控制信号、式(14)的低通滤波器以及由式(17)得到的系统控制输入组成. 其中, 动态面中的  $\omega_m$  和  $p_h$  可通过液压系统的

传感器进行测量得到; $\omega_{md}$  为外部输入; $\dot{p}_h$  为控制器计算的中间结果; $p_{hd}$  由虚拟控制信号经一阶低通滤波得到.

式(17)可进一步表示为

$$\gamma = \gamma_0 + \gamma_1 + \gamma_2 = \frac{D_p \omega_p}{K_m \omega_m} - \frac{C_t p_h}{K_m \omega_m} - \frac{\dot{p}_h V_0}{\beta_c K_m \omega_m}$$

(18)

由式(18)可知,系统控制输入(即变量马达摆角)控制律由 3 部分组成,分别为定量泵输出体积流量折算所得的变量马达摆角基准值  $\gamma_0$ 、系统泄漏对变量马达摆角的修正值  $\gamma_1$  和系统压力波动对变量马达摆角的修正值  $\gamma_2$ . 上述动态面控制可以实现变量马达转速的多闭环控制,其控制框图如图 2 所示.

由图 2 可知,采用动态面控制对变量马达摆角输入给定进行规划,对变量马达转速进行控制,具体包括 3 个闭环,分别为定量泵输出体积流量基准环、系统泄漏修正环和系统压力波动修正环.

通过动态面控制原理对变量马达转速进行多闭

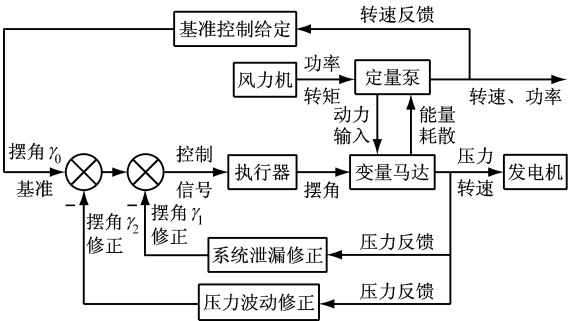


图 2 稳速控制框图

Fig. 2 Block diagram of the steady speed control

环控制,可实现机组的稳速输出,确保发电机保持同步转速且并网运行.

4 仿真和实验

以燕山大学 30 kVA 液压型风力发电机组实验台为基础,依据所提出的基于动态面控制的稳速输出控制方法进行仿真和实验研究.

利用 Matlab/Simulink 与 AMESim 软件搭建机组仿真平台(见图 3),系统参数设定见表 1.

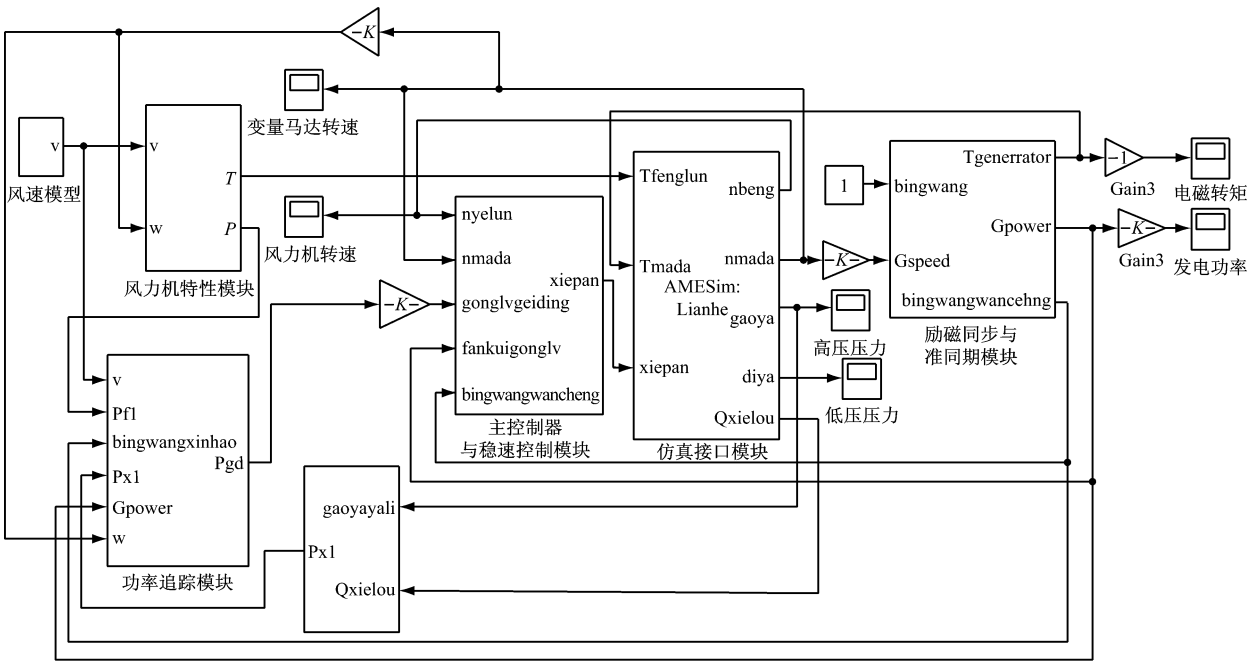


图 3 仿真平台

Fig. 3 Simulation platform for the steady speed control

实验平台由风力机模拟系统、液压系统和测控系统等组成(见图 4). 实验过程中通过变频器控制变频电机来模拟风力机特性. 采用相似模拟原理, 并进行转动惯量的模拟补偿<sup>[16]</sup>, 可对风力机输出转矩、转速和转动惯量进行相似模拟.

仿真和实验过程中, 采用相似模拟原理对实际风力机工作系统进行转速补偿<sup>[17]</sup>, 通过 Matlab/Simulink 软件对风速模型进行实时编程, 通过计算

得到风力机转速波动输入, 并将其下载到 dSPACE 控制器中, 进而采用相似模拟原理设定风力机(定量泵)波动转速输入为 400 r/min、600 r/min 和 800 r/min, 采用基于动态面控制的稳速输出控制方法对机组进行仿真和实验研究.

考虑到风能本身的间歇性和不完全可控性, 风力机输入液压系统的波动能量是机组稳速输出的关键影响因素. 因此, 首先模拟波动转速下风力机输出

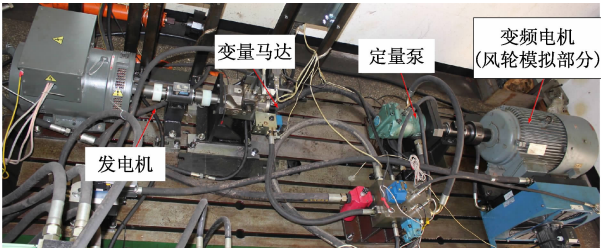
表 1 液压系统参数

Tab. 1 Parameters of the hydraulic system

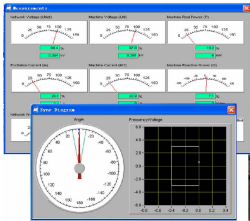
参数	数值
变量马达稳速控制值/(rad·s <sup>-1</sup> )	157
变量马达最大排量/(m <sup>3</sup> ·rad <sup>-1</sup> )	6.4×10 <sup>-6</sup>
定量泵排量/(m <sup>3</sup> ·rad <sup>-1</sup> )	1.0×10 <sup>-5</sup>
发电机与负载转动惯量/(kg·m <sup>2</sup> )	0.45
风力机转动惯量/(kg·m <sup>2</sup> )	400
低压管路溢流压力/Pa	1.2×10 <sup>6</sup>
高压管路溢流压力/Pa	3.5×10 <sup>7</sup>

特性,对风力机输出转矩进行仿真和实验研究,其结果见图 5. 由图 5 可知,采用相似模拟原理,通过变频器控制变频电机对风力机特性进行模拟,可得到波动转速下的风力机转速特性曲线. 风力机的波动转速输入是机组稳速控制的关键影响因素.

采用基于动态面控制的稳速输出控制方法对机组稳速输出进行仿真和实验研究,其结果见图6. 由



(a) 液压系统实物图



(b) 并网稳速监控

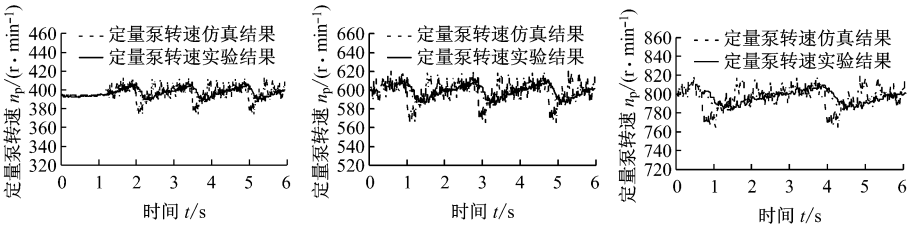


(c) 采集与控制系统实物图

图 4 实验平台

Fig. 4 Photo of the experimental platform

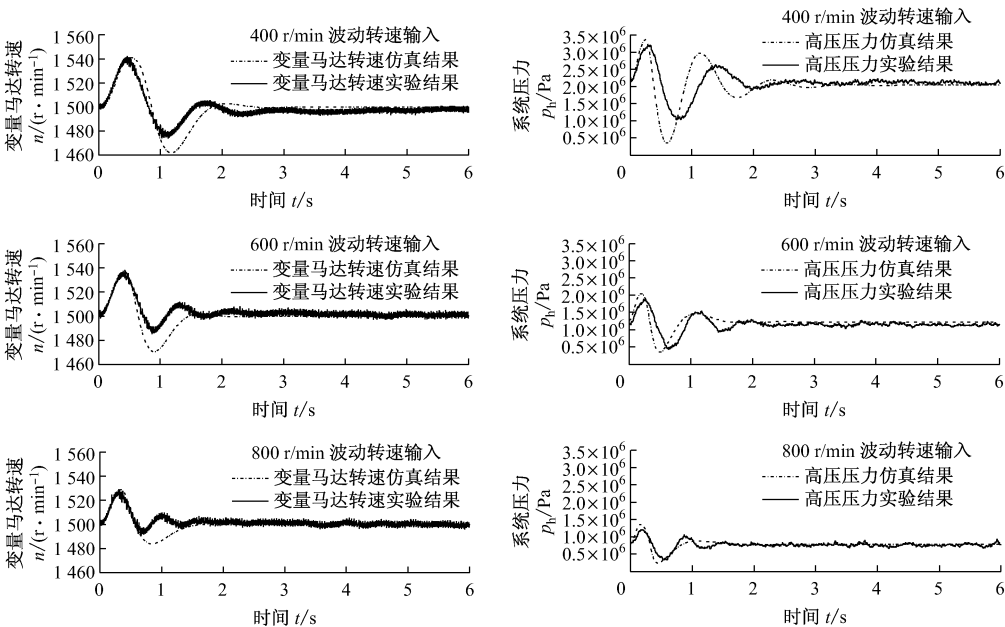
图 6 可知,采用该方法在风力机时变扰动输入下,变量马达转速可以快速稳定于同步转速 1 500 r/min,



(a) 400 r/min 波动转速输入 (b) 600 r/min 波动转速输入 (c) 800 r/min 波动转速输入

图 5 风力机(定量泵)转速曲线

Fig. 5 Speed curve of the wind turbine (fixed displacement pump)



(a) 变量马达转速仿真与实验结果 (b) 系统压力仿真与实验结果

图 6 仿真与实验结果

Fig. 6 Simulation and experimental results

其稳态误差小于 $\pm 1 \text{ r/min}$ ,同时系统压力具有较快的响应速度,最终保持于稳定压力。

## 5 结 论

(1) 建立了液压型风力发电机组风速、风力机特性数学模型和定量泵-变量马达调速系统关键参数的状态方程。提出了一种基于动态面控制的稳速输出控制方法,并对其控制律进行推导分析,得到了变量马达转速多闭环控制方案。

(2) 所提出的基于动态面控制的稳速输出控制方法具有良好的控制效果,有效地抑制了风力机输出的时变性和不确定性,实现了机组的稳速控制。

## 参考文献:

- [1] DIEPEVEEN N F B, SEGEREN M L A. Stretching the applicability of the monopile by using a delft off-shore turbine[J]. **Wind Energy**, 2012,5(3):1-10.
- [2] 孔祥东,艾超,闫桂山,等. 液压型风力发电机组低电压穿越控制方法研究[J]. **中国机械工程**, 2014,25(16):2137-2142.  
KONG Xiangdong, AI Chao, YAN Guishan, *et al.* Research on control method of low voltage ride through for hydraulic wind turbine[J]. **China Mechanical Engineering**, 2014,25(16):2137-2142.
- [3] THOMSENA K E, DAHLHAUGB O G, NISSA M O K, *et al.* Technological advances in hydraulic drive trains for wind turbines[J]. **Energy Procedia**, 2014(24):76-82.
- [4] DÍAZ-GONZÁLEZ F, SUMPER A, GOMIS-BELLMUNT O, *et al.* A review of energy storage technologies for wind power applications[J]. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 2012(16):2154-2171.
- [5] 梁双,胡学浩,张东霞,等. 考虑风速变化特性的风电容量可信度评估方法[J]. **中国电机工程学报**, 2013,33(10):18-24.  
LIANG Shuang, HU Xuehao, ZHANG Dongxia, *et al.* Capacity credit evaluation of wind generation considering wind speed variation characteristics[J]. **Proceedings of the CSEE**, 2013,33(10):18-24.
- [6] 王洋,孙伟,魏静,等. 随机风速下风力发电机组载荷传递特性研究[J]. **中国机械工程**, 2015,26(2):152-156.  
WANG Yang, SUN Wei, WEI Jing, *et al.* Research on load transmitting characteristics wind turbine under random wind speed[J]. **China Mechanical Engineering**, 2015,26(2):152-156.
- [7] 卞永明,徐新明,牛翔. 基于液压传导的风力发电系统研究[J]. **机械科学与技术**, 2013,32(7):937-941.

- BIAN Yongming, XU Xinming, NIU Xiang. Research on the wind power generation system based on hydraulic conduction[J]. **Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering**, 2013,32(7):937-941.
- [8] 艾超,孔祥东,陈文婷,等. 液压型风力发电机组主传动系统稳速控制研究[J]. **太阳能学报**, 2014,35(9):1757-1763.  
AI Chao, KONG Xiangdong, CHEN Wenting, *et al.* Research on speed control of the main translation system of hydraulic wind energy conversion system[J]. **Acta Energiac Solaris Sinica**, 2014,35(9):1757-1763.
- [9] 石茂顺,刘宏伟,李伟,等. 基于液压变压器原理的海流发电液压传动系统[J]. **浙江大学学报(工学版)**, 2014,48(5):764-769.  
SHI Maoshun, LIU Hongwei, LI Wei, *et al.* Tidal current turbine hydraulic transmission based on hydraulic transformer[J]. **Journal of Zhejiang University (Engineering Science)**, 2014,48(5):764-769.
- [10] 艾超,叶壮壮,孔祥东,等. 液压型风力发电机组主传动系统压力控制特性研究[J]. **中国机械工程**, 2015,26(6):729-732.  
AI Chao, YE Zhuangzhuang, KONG Xiangdong, *et al.* Pressure control characteristics of main transmission wind energy conversion system[J]. **China Mechanical Engineering**, 2015,26(6):729-732.
- [11] 国家电网公司. Q/GDW 392—2009 风电场接入电网技术规定[S]. 北京:中国电力出版社,2009.
- [12] 李永建,殷玉枫,丁健刚,等. 随机风载荷下大型风力机叶片/机舱/塔架耦合动力学分析[J]. **可再生能源**, 2014,32(7):992-997.  
LI Yongjian, YIN Yufeng, DING Jiangang, *et al.* Coupling dynamics analysis on blades/nacelle/tower of large-scale wind turbine with stochastic wind load[J]. **Renewable Energy Resources**, 2014,32(7):992-997.
- [13] 刘吉臻,胡阳,林忠伟. 风力发电系统大范围功率可调控研究[J]. **动力工程学报**, 2014,34(10):778-783.  
LIU Jizhen, HU Yang, LIN Zhongwei. Study on widely-ranged power-adjustable control for wind turbine generation system[J]. **Journal of Chinese Society of Power Engineering**, 2014,34(10):778-783.
- [14] 吴忠强,夏青,彭艳,等. 高阶非线性液压辊缝系统的Backstepping动态面控制[J]. **仪器仪表学报**, 2012,33(4):949-954.  
WU Zhongqiang, XIA Qing, PENG Yan, *et al.* Backstepping dynamic surface control for high-order nonlinear hydraulic roll gap system[J]. **Chinese Journal of Scientific Instrument**, 2012,33(4):949-954.

- [3] 赵毅, 王伟, 王亚君, 等. 湿式烟气脱硫塔中折线型挡板除雾器分离效率的数值模拟[J]. *动力工程学报*, 2005, 25(2): 294-295.  
ZHAO Yi, HUA Wei, WANG Yajun, *et al.* Numerical simulation of separation efficiency of demisters with serrated baffles in wet flue gas desulfurization towers [J]. *Chinese Journal of Power Engineering*, 2005, 25(2): 294-295.
- [4] 赵毅, 王伟, 王小明, 等. 湿式烟气脱硫设备中折线型挡板除雾器压降的数值模拟[J]. *中国电机工程学报*, 2004, 24(8): 215-218.  
ZHAO Yi, HUA Wei, WANG Xiaoming, *et al.* Numerical simulation of pressure drop at a vane-type mist eliminator in wet FGD system[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2004, 24(8): 215-218.
- [5] 洪文鹏, 刘广林, 裴彩锋, 等. 入口角度对氨法烟气脱硫塔内气液流场影响的数值模拟[J]. *动力工程学报*, 2012, 32(4): 326-331.  
HONG Wenpeng, LIU Guanglin, PEI Caifeng, *et al.* Influence of entrance angle on gas-liquid flow field in ammonia flue gas desulphurization tower[J]. *Journal of Chinese Society of Power Engineering*, 2012, 32(4): 326-331.
- [6] 姚杰, 仲兆平, 周山明. 湿法烟气脱硫带钩波纹板除雾器结构优化数值模拟[J]. *中国电机工程学报*, 2010, 30(14): 61-67.  
YAO Jie, ZHONG Zhaoping, ZHOU Shanming. Numerical simulation on wave-plate demister with hamulus in wet flue gas desulfurization[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2010, 30(14): 61-67.
- [7] GALLETTI C, BRUNAZZI E, TOGNOTTI L. A numerical model for gas flow and droplet motion in wave-plate mist eliminators with drainage channels [J]. *Chemical Engineering Science*, 2008, 63(23): 5639-5652.
- [8] 杨柳. 燃煤烟气脱硫脱氮一体化工艺及技术研究[D]. 南京: 东南大学, 2006.
- [9] 孙志春, 郭永红, 肖海平, 等. 鼓泡脱硫塔除雾器除雾特性数值研究及实验验证[J]. *中国电机工程学报*, 2010, 30(8): 68-73.  
SUN Zhichun, GUO Yonghong, XIAO Haiping, *et al.* Numerical simulation and experimental validation on demisting characteristic of the mist eliminator for jet bubble reactor desulfurization system[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2010, 30(8): 68-73.
- [10] 郝雅洁, 刘嘉宇, 袁竹林, 等. 除雾器内雾滴运动特性与除雾效率[J]. *化工学报*, 2014, 65(12): 4672-4676.  
HAO Yajie, LIU Jiayu, YUAN Zhulin, *et al.* Movement characteristics of droplets and demisting efficiency of mist eliminator[J]. *CIESC Journal*, 2014, 65(12): 4672-4676.

(上接第 35 页)

- [15] 王允建, 刘贺平, 王玲. 自寻优自适应动态面控制[J]. *控制与决策*, 2010, 25(6): 939-952.  
WANG Yunjian, LIU Heping, WANG Ling. Self-optimize adaptive dynamic surface control[J]. *Control and Decision*, 2010, 25(6): 939-952.
- [16] 艾超, 孔祥东, 闫桂山, 等. 液压型风力发电机组最优功率追踪控制方法研究[J]. *动力工程学报*, 2015, 35(2): 126-133.  
AI Chao, KONG Xiangdong, YAN Guishan, *et al.* Research on maximum power point tracking of hydraulic wind turbine[J]. *Journal of Chinese Society of Power Engineering*, 2015, 35(2): 126-133.
- [17] 艾超. 液压型风力发电机组转速控制和功率控制研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2012: 108-111.