

## 一种变速风力机全风速范围发电策略

陈冉 陈志辉 陈杰 陈家伟 龚春英 严仰光

(南京航空航天大学航空电源航空科技重点实验室,南京,210016)

**摘要:**由于风力机系统复杂的机械阻尼和大惯量等强非线性因素的存在,增大了控制策略设计与实现的难度。同时,对于变速风力发电系统而言,风力机的转速控制器设计是实现发电控制策略的重要环节。本文首先分析了定桨距变速风力机全风速段的发电策略,针对传统方案所存在的问题,提出了新型的控制策略,该策略在不同运行状态之间的过渡过程迅速平滑,有效降低了系统的动态载荷;其次,基于现有的风力发电系统分析了定桨距风力机的小信号模型,推导了风力机系统的传递函数,并为转速控制环设计了PID控制器;最后,通过仿真和实验,验证了全风速段发电策略的可行性和有效性。

**关键词:**风力发电;风力机模型;转速控制;最大功率跟踪阶段;发电策略

中图分类号:TM46

文献标识码:A

文章编号:1005-2615(2012)02-0211-06

## Full Range Control Strategy of Variable-Speed Wind Turbines

Chen Ran, Chen Zhihui, Chen Jie, Chen Jiawei, Gong Chunying, Yan Yangguang

(Aero-Power Science Technology Center, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, 210016, China)

**Abstract:** The turbine speed loop adjustment is a key link of the designing of the controller for the fixed pitch variable speed wind energy conversion system (WECS). Because of the strong nonlinear, big inertia and mechanical damping characteristics, it is difficult to design the controller of the wind power systems. A control strategy for variable-speed wind power conversion system is proposed, which can reach the maximum power point or keep the rotating speed constant when wind speed is under the rated value, and keep the rated output power above the rated wind speed. Then, a small signal model is presented, and a wind turbine speed loop regulator is designed. Finally, simulation system is built, and the results of the simulation and experiments show that the performance of the controller algorithm meet the requirements of WECS without wind measurement.

**Key words:** wind power generation; wind turbine modeling; speed control; maximum power point tracking (MPPT); control strategy

风力发电技术作为可再生能源开发和利用的一种主要方式,因为技术和政策上的优势脱颖而出。与潮汐、太阳能发电相比,风力发电的效率可高达50%,具有与常规发电方式可比的竞争力<sup>[1]</sup>。得益于大功率电力电子变换设备的实用化,现今的商业风力发电机组已从早期的恒速恒频发展为主流的变速恒频风力机组。相对于恒速风电机组,变速

机组在提高风能利用效率、避免对电网造成闪变、减小噪声污染以及降低机械应力等方面具有较大的优势<sup>[2]</sup>。

并网型风力机组从20世纪80年代开始商用,容量从数十千瓦发展到兆瓦级。尽管在兆瓦级风力机组设计中已经采用了变桨距控制技术,但由于增加了控制和伺服系统,对机组的成本和可靠性提出

基金项目:国家重点基础研究发展计划(“九七三”计划)(2007CB210303)资助项目。

收稿日期:2011-07-13;修订日期:2011-11-11

通讯作者:龚春英,女,教授,博士生导师,1965年生,E-mail:zjnigey@nuaa.edu.cn。

了挑战。综合结构简单、性能可靠的特点,传统的变速定桨距风力发电机组在千瓦级的中小功率场合仍有应用优势和改进潜力<sup>[3]</sup>,并逐渐成为偏远欠发达地区用户的用电来源<sup>[4]</sup>。因此,本文将中小型定桨距变速风电机组作为对象,对其发电控制策略和控制特性展开研究。

风力发电机组的控制主要有气动转矩控制和电磁转矩控制两种方式。前者使用变桨距或阻尼板的方法,改变桨叶气动特性以控制机组的工作点;后者通过调节发电机组的等效负载(如并网功率等),改变发电机的反电磁力矩,达到改变机组转速的目的。两种控制方式在不同的控制阶段配合使用,以实现完整的全风速发电策略。对于定桨距风力机,在额定风速以下的最大功率跟踪阶段(Maximum power point tracking, MPPT)多使用电磁转矩控制方式,当风速上升至额定风速时,通过继续加大电机阻转矩或张开阻尼板的方法,压低风力机转速,调节风力机的失速程度,以达到限制转矩的功效。

风力机发电控制策略通常包括额定风速下最大功率跟踪、恒转速及恒功率3种运行状态。目前,国内外对定桨距变速风力发电机组在全风速范围内的控制策略研究较少<sup>[5-7]</sup>,主要通过判断风速、转速或功率信号来选取相应的控制回路。当系统在切换点附近时,会出现控制回路频繁切换,引起系统的震荡,为了减少这种状况,需要在切换点附近引入较大的比较环宽,由此降低了机组的运行效率。文献[8]通过滑模控制器,使风机系统通过转速反馈,为发电策略过渡过程中的转矩振荡提供足够的阻尼转矩,但是其控制系统的反馈增益仍存在最佳值选取的问题。文献[9]将H<sub>∞</sub>鲁棒控制方法用于设计失速型变速风力发电控制系统,降低了由于风速波动和策略切换所引起的有害动态负载、机械应力。但控制器需要准确的权重函数,设计较为复杂。

针对上述文献存在的不足,本文做了如下工作:首先,本文分析了定桨距变速风力机全风速段的发电策略,针对传统方案所存在的问题,提出了新型的控制策略,该策略在不同运行状态之间的过渡过程迅速平滑,有效降低了系统的动态载荷;其次,基于现有的风力发电系统分析了定桨距风力机的小信号模型,推导了风力机系统的传递函数,并为转速控制环设计了PID控制器;最后,通过仿真和实验,验证了全风速段发电策略的可行性和有效

性,提高了系统的响应速度和风能萃取效果。

## 1 风力机发电策略分析

### 1.1 定桨距机组的全风速发电策略

变速定桨距风力发电机组全风速范围的控制策略根据风况不同一般可分为4个阶段,整个运行区域如图1所示。图中, $P_a, P_b, P_c$ 分别对应C, D, E工作点的功率值。

第1阶段为启动阶段,发电机转速从静止上升到切入风速。对于定桨距风力机而言,可通过发电机做电动运行来启动发电,或依靠风力机的气动设计,将风轮桨叶的最佳翼尖速比设计值降低或加大风力机半径,以实现风力机的低风速启动。运行区域对应图1中AB段。

第2阶段为额定转速对应风速以下区域,即机组切入电网后发电运行。该阶段目标是跟踪 $C_{pmax}$ 曲线,调节风力机转速,使得风轮始终运行于最大功率点,实现最大功率跟踪运行。此阶段对应图1中BE段。

第3阶段为恒转速发电阶段。当转速高于额定转速时,由于机组的机械极限的限制,必须限制风力机的转速。对于定桨距风力机,工作在恒转速阶段时,必须提高发电机有功输出,以控制发电机转速,使机组离开最佳工作点,进入失速状态运行,机组能量转换效率降低。此阶段对应图1中EF段。

第4阶段为恒功率发电阶段,对应图1中FG段。随着风速继续增大,需要主动限制机组的输出功率。对于变速定桨距机组而言,主控单元需发送指令使发电机转速降低,风力机进入深度失速状态,此时能量转换效率 $C_p$ 较低,从而保持发电功率恒定。

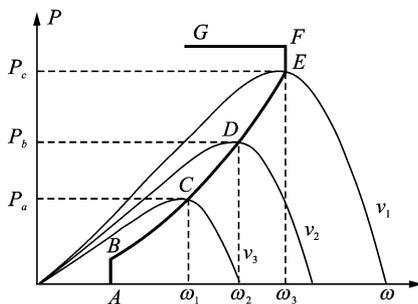


图1 风力机功率-转速曲线

全风速发电过程中虽然各段运行策略不需要实测风速直接参与计算,但是其策略之间的过渡仍然依赖风速作为判据<sup>[10]</sup>。实际情况下,叶轮的扫略面较大,在整个叶轮面积内,并不是每一位置的风

速都是一致的,风速检测的误差较大,实时性也不能保证,用来作为算法的控制量会有很大误差<sup>[11]</sup>。同时,传统策略需要考虑不同运行的切换过渡过程是否平滑<sup>[12]</sup>,这不但影响风力机组的动态响应时间,更会使机组承受不同的机械、电气应力。所以,传统的发电策略有巨大的改进空间。

## 1.2 改进的基于功率反馈的全风速控制方案

图2给出了改进的全风速控制策略的结构框图。该控制策略仅采用两个调节器就实现了MPPT、恒转速和恒功率3种运行模式以及3种运行模式之间的软过渡,大大减小了机组承受的动态载荷,提高了机组的使用寿命。

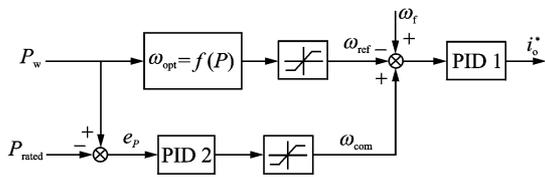


图2 改进的全风速控制策略结构

### (1)MPPT 运行模式

在该运行状态下,调节器PID2反向饱和,控制框图简化为图3。机组工作在MPPT发电阶段,无论使用何种风力机,在此阶段的风力机机械功率均与转速的立方成正比。所以,只需调节发电机转速给定以符合式(1)关系,即可实现风力机系统MPPT运行。

$$\omega = \sqrt[3]{P_w / K_{opt}} \quad (1)$$

由风力机的空气动力学可知,式(1)中参数 $K_{opt}$ 表达为

$$K_{opt} = \frac{1}{2} \rho R^3 A C_{pmax} / \lambda_{opt}^3 \quad (2)$$

式中: $\rho$ 为流场中的空气密度; $R$ 为风力机半径; $A$ 为风力机迎风扫略面积; $C_{pmax}$ 为风力机的最大风能利用系数; $\lambda_{opt}$ 为最佳叶尖速比。

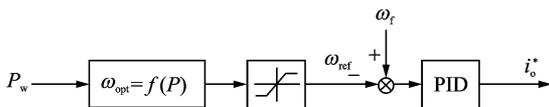


图3 MPPT策略简化

### (2)恒速运行模式

随着风速的增加,输出功率增大,最佳转速给定值 $\omega_{ref}$ 也会增加。当转速增加到限幅值 $\omega_{uplimit}$ 后,转速给定将维持不变,机组进入恒转速控制,等效控制框图如图4所示。

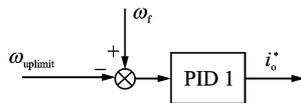


图4 恒速控制等效结构

### (3)恒功率运行模式

随着风速进一步增加,机组运行功率 $P_w$ 将进一步增大。当机组功率达到额定功率 $P_{rated}$ 时(此时风速对应额定风速),调节器PID2开始退出饱和状态,输出一个转速补偿量 $\omega_{com}$ 。该补偿量加入转速调节器(PID1)的转速基准,旨在降低转速给定,从而使机组转速下降,机组进入深度失速区运行,风能利用率降低,机组输出功率保持恒定。图5为其等效控制框图。

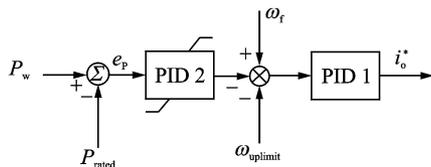


图5 恒功率控制等效结构

## 2 风力机特性分析及转速控制器的设计

### 2.1 风力机的气动特性分析

风力机的风能利用系数 $C_p$ 仅为 $\lambda$ 的函数,只能找到唯一使得 $C_p$ 具有最大值的叶尖速比 $\lambda$ ,称为最佳叶尖速比,用 $\lambda_{opt}$ 表示。对应的 $C_p$ 称为最佳风能利用系数,用 $C_{pmax}$ 表示,如图6所示。

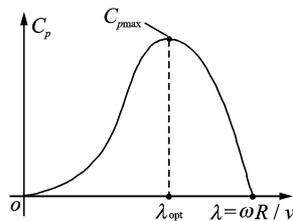


图6 风力机典型 $C_p$ - $\lambda$ 曲线

如前文所述,风力机在额定风速下,处于MPPT运行模式,机组运行在 $C_{pmax}$ 工作点。因此,只要在运行过程中保持 $\lambda = \lambda_{opt}$ ,就可以维持风力机在最大风能利用系数下工作,获取最大风能,增加输出功率。因此,当风速变化时,只要调整风轮转速,使其叶尖速比最优,即可实现最大功率跟踪,控制框图如图3,其风轮转速给定值可由式(1)获得。

### 2.2 风力机转速环特性分析

作为风力机组运行控制的基本环节,发电机转速控制环的设计非常重要。本部分内容将分析机组传动

链小信号模型,并推导定桨距风力机转速控制环的开环传递函数,以便在此基础上对图2中的风力机组转速控制环调节器PID1进行分析与优化设计。

在直驱式机组中,风力机与发电机直接刚性相连,省去了增速齿轮箱。因此,可以近似地认为传动轴无刚性扭转,从而可以得到简化后机组的传动链数学模型<sup>[13-14]</sup>

$$T_r - T_e = J \frac{d\omega}{dt} + B\omega \quad (3)$$

式中: $T_r$ 为风力机的气动转矩; $T_e$ 为发电机的电磁转矩; $B$ 为系统的等效转动粘滞系数; $\omega$ 为发电机的转动角速度,对于直驱式机组也即风力机的转速; $J$ 为传动链上各部件转动惯量之和。

图7所示为系统转速环控制框图,由式(3)可知,风电机组通过改变发电机的电磁转矩 $T_e$ 来调节转速。在某个稳态工作点 $Q(\Omega_o, V_o)$ 附近对式(3)所示的气动转矩进行小信号分析,有

$$\hat{T}_r - \hat{T}_e = J\dot{\hat{\omega}} + B\hat{\omega} \quad (4)$$

式中,风力机气动转矩 $\Delta T_r$ 与风速 $v$ 及转速 $\omega$ 有关,即

$$\begin{cases} T_r = \frac{1}{2}\rho\pi R^3 v^2 C_T(\lambda, \beta) \\ \lambda = \omega R/v \end{cases} \quad (5)$$

式中: $\rho$ 为空气密度; $R$ 为风轮半径; $v$ 为风速, $C_T(\lambda, \beta)$ 为转矩系数,是桨距角 $\beta$ 和叶尖速比 $\lambda$ 的函数,对于定桨距机组桨距角 $\beta$ 不变, $C_T$ 仅为 $\lambda$ 的函数。

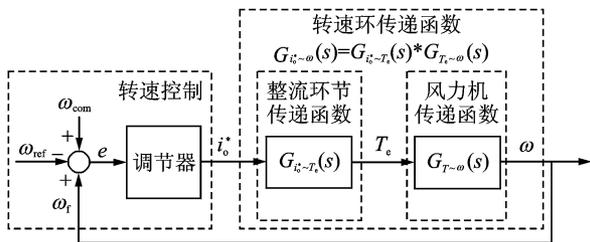


图7 系统转速环控制

因此,在平衡点 $Q(\Omega_o, V_o)$ 附近,风力机气动转矩变化量 $\Delta T_r$ 为转速变化量 $\Delta\omega$ 和风速变化量 $\Delta v$ 的线性函数,即

$$\Delta T_r = \left( \frac{\partial T_r}{\partial \omega} \Big|_{Q(\omega_o, v_o)} \right) \times \Delta\omega + \left( \frac{\partial T_r}{\partial v} \Big|_{Q(\omega_o, v_o)} \right) \times \Delta v = \gamma \times \Delta\omega + \alpha \times \Delta v \quad (6)$$

式中线性系数 $\gamma, \alpha$ 必须以风力机的平衡点 $Q(\Omega_o, V_o)$ 来计算,即

$$\begin{cases} \gamma = \frac{\partial T_r}{\partial \omega} \Big|_{Q(\omega_o, v_o)} = \frac{1}{2}\rho\pi R^4 V_o \times \left( \frac{dC_T}{d\lambda} \Big|_{Q(\omega_o, v_o)} \right) \\ \alpha = \frac{\partial T_r}{\partial v} \Big|_{Q(\omega_o, v_o)} = \frac{1}{2}\rho\pi R^3 v_o \times \left[ 2C_T(\lambda_o) - \lambda_o \left( \frac{dC_T}{d\lambda} \Big|_{Q(\omega_o, v_o)} \right) \right] \end{cases} \quad (7)$$

综合式(4,6),得到机组在平衡点的线性化方程

$$\dot{\hat{\omega}} = -\frac{B + \gamma(\Omega_o, v_o)}{J} \hat{\omega} + \frac{\alpha(\Omega_o, v_o)}{J} \hat{v} - \frac{\hat{T}_e}{J} \quad (8)$$

由此可得,发电机电磁转矩到机组转速的传递函数

$$G_{T_e \sim \omega}(s) \Big|_{v=0} = \frac{-1}{Js + B + \gamma(\Omega_o, v_o)} \quad (9)$$

由于系统中采用了不控整流,其工作方式随着机组的运行状态有所不同,模型很难从理论上推导得出。本文采用了模型辨识的方法,通过实验的手段测试输出电流到发电机电磁转矩的阶跃响应,配合Matlab辨识工具箱得到输出电流指令到发电机电磁转矩的传递函数如下

$$G_{i_o^* \sim T_e}(s) = \frac{-64.43s + 31756}{\Omega_Q(s^2 + 19.34s + 1059)} \quad (10)$$

由式(7,8),可得输出电流指令到机组转速的开环传递函数为

$$G_{i_o^* \sim \omega}(s) \Big|_{v=0} = \frac{-1}{Js + B + \gamma(\Omega_o, v_o)} \cdot \frac{-64.43s + 31756}{\Omega_Q(s^2 + 19.34s + 1059)} \quad (11)$$

根据式(11),可以绘出不同静态工作点 $Q(\Omega, v)$ 下系统的幅频特性曲线,如图8所示。在不同工作点下,机组的特性随着所对应 $\lambda_{opt}$ 的变化而变化。在 $\lambda < \lambda_{rmax}$ 时系统变为非最小相位系统,开环不稳定,即在低转速高风速(深度失速区)时,系统的性能最差。因此,为保证闭环系统在全风速范围内的稳定性,PID调节器设计时需要将稳态工作点选取在切出风速下的最低转速,即 $Q(\Omega_{min}, v_{max})$ 处。

由此,本文采用的PID控制器比例、积分、微分增益分别为: $K_p=10, K_i=7, K_d=0.1$ 。系统的截止频率为2.71 Hz,相角裕度等于45.8°。

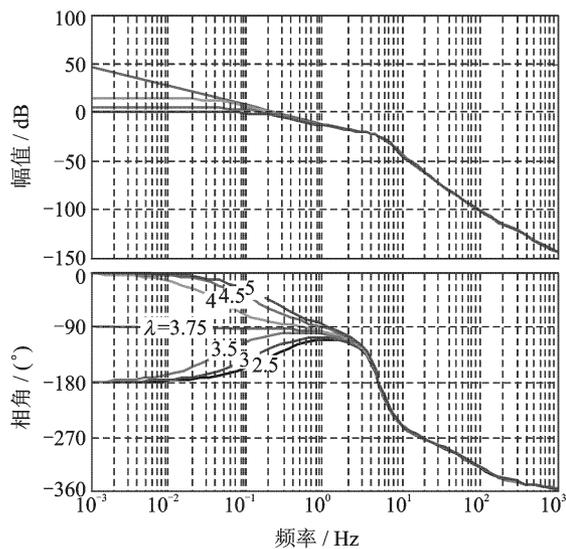


图8 系统开环幅频特性

### 3 仿真与实验验证

#### 3.1 风力发电机组实验系统

图9所示为本文采用的1.5 kW的直驱式变速定桨距风力发电机组的实验平台结构框图。主要由模拟风轮的原动机、永磁同步发电机、整流器以及作为发电机等效负载的DC/DC变换器、储能蓄电池以及高能耗负载构成。风轮机模拟机的转矩给定、负载控制信号和采样信号均由工控计算机处理、计算及控制。机组参数具体见表1。

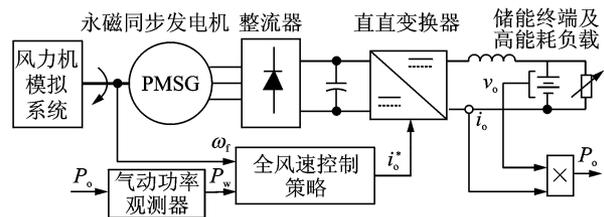


图9 定桨距变速风力发电机组

表1 风力机及永磁发电机参数

风力机参数	数值	PMSG 参数	数值
风轮直径/m	1.90	额定转速/(r·min <sup>-1</sup> )	500
叶片数	3	极对数	4
转动惯量/(kg·m <sup>2</sup> )	0.39	转动惯量/(kg·m <sup>2</sup> )	0.028
额定功率/kW	1.5	额定功率/kW	7.5
额定风速/(m·s <sup>-1</sup> )	15	额定电压/V	110
最佳风能利用系数C <sub>pmax</sub>	0.28	磁通/Wb	0.435

实验平台的风机模拟部分,通过对伺服电动机的转矩控制,实现了原动机对实际风机稳态和动态特性的准确拟合。图10为在此基础上构建的变速定桨距风力发电机组实验平台。该平台采用LAB-View编写了上位机程序,不仅拥有良好的人机交互界面,系统各参数的测量方式亦灵活多样,运行中的关键数据可由控制器的D/A通道输出供示波器记录。

#### 3.2 实验过程及结果分析

为了验证文中提出的全风速功率控制策略的正确性,在Matlab/Simulink环境下建立了与实验平台对应的仿真模型。图11(a)为仿真结果,给出了风速从6 m/s开始、以平均值0.2 m/s<sup>2</sup>的加速度缓慢增加到22 m/s的风力机几个主要参数的变化波形。可以看到,在18 s附近时,风速开始由6 m/s上升,上升过程中机组C<sub>p</sub>值始终保持在C<sub>pmax</sub>(0.28),机组实现了MPPT运行(图中A段);在65 s附近时风力机到达额定转速500 r/min,此时转速被限幅,发电

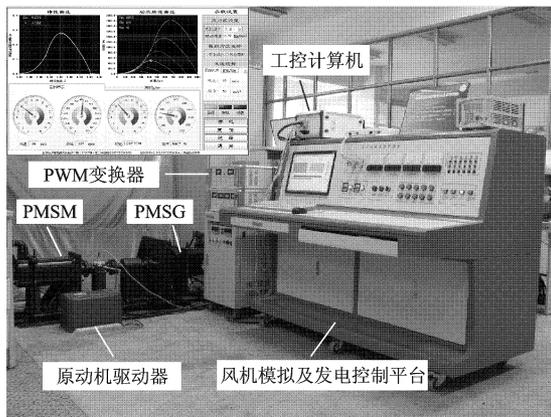
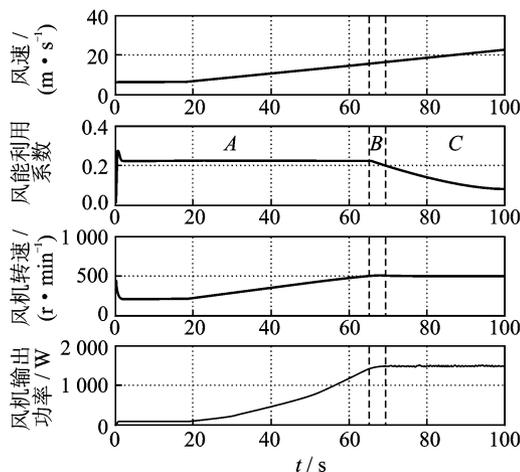
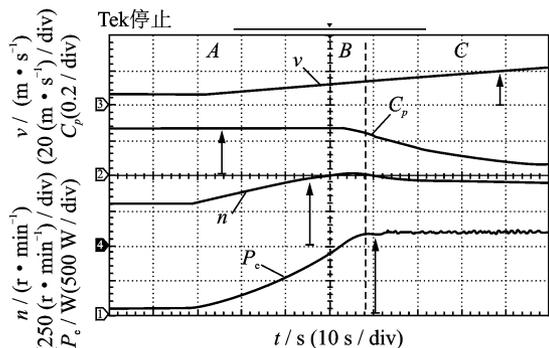


图10 实验系统结构图

策略切换到恒转速策略(图中B段);随着风速增加,在68 s附近,风力机输出功率到达额定值1.5 kW,进入恒功率发电阶段(图中C段),在PID2平滑的退饱和过程中,将恒功率策略的转速偏置量 $\omega_{com}$ 加入到转速环的给定值 $\omega_{ref}$ 中,降低了转速,抑制了气动功率的上升,实现恒功率运行。图11(b)为模拟风力机实验平台的实验结果,整个实验运行状态可与仿真结果对应,各个发电策略的过渡过程不依赖任何切换函数,实现了发电阶段策略的平滑过渡。



(a) 仿真波形



(b) 实验波形

图11 全风速控制策略实验波形

为了检验新型的全风速发电控制策略的正确性和有效性,本文记录了随机风速时,系统参数的实验波形,见图12。图中4~7 s,风速持续增大,介于12~14 m/s,机组运行在恒转速状态;7~26 s,风速超过15 m/s,控制系统加大发电机的负载,压低机组转速,使风力机失速,此时机组功率保持在1.5 kW,运行在恒功率状态;28~60 s,系统运行在MPPT状态,此时,机组转速低于500 r/min,  $C_p$  值始终保持在  $C_{pmax}$  (0.28)。

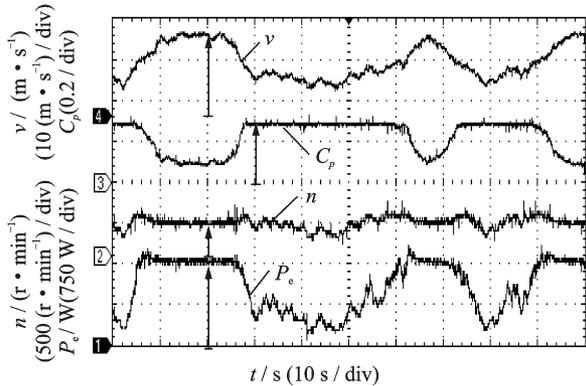


图12 随机风速下的实验波形

## 4 结束语

本文分析了风力机的小信号模型,基于现有仿真系统推导了风力机转速环的开环传递函数,并为转速控制环设计了PID控制器。针对变速定桨距风力机全风速段发电策略所存在的问题,提出了新型的控制策略,该策略在不同运行状态之间的过渡过程迅速平滑,有效降低了系统的机械、电气应力,并得到了实验验证。

## 参考文献:

- [1] Hansen A D, Iov F, Blaabjerg F, et al. Review of contemporary wind turbine concepts and their market penetration[J]. Wind Engineering, 28(3): 247-263.
- [2] Stol K A. Disturbance tracking and blade load control of wind turbines in variable-speed operation [C]//Proc 2003 AIAA/ASME Wind Symposium. Reno, Nevada: AIAA, 2003:317-323.
- [3] 叶杭冶. 风力发电机组的控制技术[M]. 北京:机械工业出版社, 2006:13-33.
- [4] Teodorescu R, Blaabjerg F. Flexible control of small wind turbines with grid failure detection operating in stand-alone and grid-connected mode [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2004, 19(5): 1323-1332.
- [5] Boukhezzer B, Siguerdidjane H, Mauveen Hand M.

Nonlinear control of variable-speed wind turbines for generator torque limiting and power optimization[J]. Transactions of the ASME, 2006,128(14):516-530.

- [6] 徐大平,张新房,柳亦兵. 风力发电控制问题综述[J]. 中国电力, 2005, 38(4): 70-74.  
Xu Daping, Zhang Xinfang, Liu Yibing. Overview of relevant control problems of wind turbines [J]. Electric Power, 2005, 38(4): 70-74.
- [7] Fingersh L J, Carlin P W. Results from the NREL variable speed test bed[R]. Paper No. AIAA-98-0050, 1998.
- [8] Rocha R. Control of stall regulated wind turbine through  $H_{\infty}$  loop shaping method [C]//Proc of the 2001 IEEE Int Conf on Control Appl. Mexico: IEEE, 2001:925-929.
- [9] Battista H D, Mantz R J. Sliding mode control of torque ripple wind energy conversion system with slip power recovery [C]//Proc of the 24th Annual Conf of IEEE, IECON' 98. Canadian: IEEE, 1998: 651-656.
- [10] Fernando D, Hernán De Battista, Ricardo J. Wind turbine control systems [M]. Germany: Springer, 2007.
- [11] 赵仁德,王永军,张加胜. 直驱式永磁同步风力发电系统最大功率追踪控制[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(27):106-111.  
Zhao Rende, Wang Yongjun, Zhang Jiasheng. Maximum power point tracking control of the wind energy generation system with direct-driven permanent magnet synchronous generators [J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(27): 106-111.
- [12] 赵永祥,夏长亮,宋战锋,等. 变速恒频风力发电系统风机转速非线性PID控制[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(11):133-138.  
Zhao Yongxiang, Xia Changliang, Song Zhanfeng, 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.
- [13] 李晶,宋家骅,王伟胜. 大型变速恒频风力发电机组建模与仿真[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(6):100-105.  
Li Jing, Song Jiahua, Wang Weisheng. Modeling and dynamic simulation of variable speed wind turbine with large capacity [J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(6): 100-105.
- [14] 林志明,潘东浩,王贵子,等. 双馈式变速变桨风力发电机组的转矩控制[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(32):118-124.  
Lin Zhiming, Pan Donghao, Wang Guizi, et al. Torque control of doubly-fed variable speed variable pitch wind turbine [J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(32): 118-124.