

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2014.06.020

基于PLC和直流电机的风力发电 模拟平台试验研究*

任丽娜¹, 杨娟霞¹, 刘吉斯², 刘福才^{1*}

(1. 燕山大学 工业计算机控制工程河北省重点实验室, 河北 秦皇岛 066004;
2. 海湾安全技术有限公司, 河北 秦皇岛 066004)

摘要: 为解决风力发电中的风能利用问题,以直流电机为原动机,搭建了基于BECKHOFF PLC的永磁直驱风力发电模拟试验平台,并使用KingView组态软件开发了人机交互界面。风力发电模拟平台采用DC Driver来实现直流电动机模拟风机的转矩控制,采用下位机控制软件TwinCAT PLC集成的PID算法实现永磁同步发电机的转速控制,从而实现风力机的转矩特性模拟和永磁同步发电机的最佳转速追踪控制。最后,在所搭建的实验平台上对基于最佳叶尖速比的最大风能捕获控制方案进行了试验研究。研究结果表明,模拟风机可以动态地追踪最大功率点,验证了风机模拟平台的有效性。

关键词: 风力发电; BECKHOFF PLC; 直流电机; 最大功率点跟踪

中图分类号: TH39; TM614 文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2014)06-0769-06

Experimental research of wind power simulation platform based on PLC and DC motor

REN Li-na¹, YANG Juan-xia¹, LIU Ji-si², LIU Fu-cai¹

(1. Key Lab of Industrial Computer Control Engineering of Hebei Province, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China; 2. Gulf Security Technology Company, Qinhuangdao 066004, China)

Abstract: In order to solve the problems of wind energy in the wind power, an experimental platform has been developed to simulate the wind power system. The system consists of a DC motor, which drives a permanent magnet synchronous generator (PMSG). In the experiment, BECKHOFF PLC was used as the main controller and the upper computer control interface was designed using KingView. The shaft torque of a DC motor was regulated by the DC Driver and the speed of the PMSG was controlled by the PID algorithm in the TwinCAT PLC controller toolbox thus realizing the imitation of the wind turbine torque characteristic and the optimum speed tracking of the PMSG. At last, experiments were carried out on the platform for the control strategy of maximum power point tracking (MPPT) based on optimal tip speed ratio (TSR). The results show that MPPT is implemented dynamically under a variety of wind conditions, thus verifying the validity and feasibility of the experimental platform.

Key words: wind power; BECKHOFF PLC; DC motor; maximum power point tracking (MPPT)

收稿日期: 2013-12-26

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61304025); 国家高等学校博士学科点专项基金资助项目(20111333110007); 河北省自然科学基金资助项目(F2014203234)

作者简介: 任丽娜(1982-), 女, 河北秦皇岛人, 讲师, 主要从事风力发电方面的研究. E-mail: renlina@ysu.edu.cn

通信联系人: 刘福才, 男, 教授, 博士生导师. E-mail: lfc@ysu.edu.cn

0 引 言

风电是新能源中技术最成熟、最具开发规模和商业化发展前景的发电方式之一,风力发电技术也成为了世界各国研究的热点^[1-2]。其中,如何获得最多的风能以及提高系统运行的可靠性等一系列关键问题得到了越来越多的关注。在这些关键问题的研究中,建立有效的模拟实验平台,从而为先进控制技术的研究提供实际平台支持,促进风力发电技术的进步,就显得非常重要和必要了。

众所周知,风力发电机组控制系统是机组运行的“大脑”,是整个机组正常可靠运行以及实现最大风能追踪的可靠保证^[3]。现有的实验室搭建的风力发电模拟平台中,采用的主控制器有工控机、PLC、单片机、DSP以及ARM嵌入式系统等^[4-6]。以工控机、DSP等为控制器的系统,由于没有集成的算法模块,编程工作特别繁琐。通过选用PLC作为主控制器,不但可以用简单的程序来实现复杂的逻辑控制,而且具有稳定性高的特点^[7-8]。德国倍福(BECKHOFF)公司嵌入式控制器是一种基于工业PC和PLC之间的嵌入式PC,不仅兼容了传统PLC的所有功能,而且还有运动控制和组态(HMI)功能,其基于PC的控制技术,开放性好、速度快、运算能力强,具有传统PLC系统无法比拟的强大功能^[9]。

综上所述,本研究搭建基于BECKHOFF PLC和直流电动机的永磁直驱风力发电模拟平台。首先,依据风力机特性,给出风力机的转矩特性曲线与功率特性曲线,然后以直流电机为原动机,通过对直流电机的直接转矩控制实现风力机的转矩特性模拟;使用PID算法控制永磁同步发电机的转速,并通过调节Buck电路占空比实现永磁同步发电机的最佳转速追踪,实现风力机的最大风能捕获,验证控制策略的可实际操作性以及实验平台的有效性,为风力发电控制技术的进一步研究奠定基础。

1 风力机的特性

风力机的特性通常是由一簇包含功率系数 C_p 和叶尖速比 λ 的无因次性能曲线来表达。桨叶节距角为零的一条典型的 $C_p-\lambda$ 曲线如图1所示。

叶尖速比可以表示为:

$$\lambda = \frac{R\omega_r}{v} = \frac{v_r}{v} \quad (1)$$

式中: ω_r —风力发电机组叶轮角速度,rad/s; R —叶片半径,m; v —主导风速; v_r —叶尖线速度,m/s。

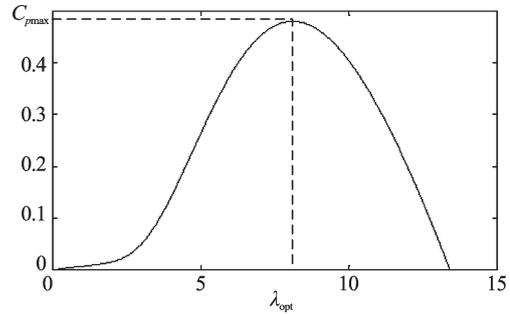


图1 风力机 $C_p-\lambda$ 曲线

根据风力发电机组的能量转换公式,风力发电机组从风中获取的机械功率为^[10-11]:

$$P = \frac{1}{2} \rho v^3 \pi R^2 C_p \quad (2)$$

式中: ρ —空气密度; v —风速; R —风力机半径; C_p —风能利用系数。

由式(2)可见,在风速给定的情况下,叶轮获得的功率将取决于功率系数。如果在任何风速下,风力发电机组都能在 $C_{p_{max}}$ 点运行,便可增加其输出功率。由图1可知,只要使得叶轮的叶尖速比 $\lambda = \lambda_{opt}$,就可维持风力发电机组在 $C_{p_{max}}$ 下运行。因此,风速变化时,只要调节叶轮转速,使叶尖速度与风速之比保持不变,就可获得最佳的功率系数。这就是风力发电机组进行转速控制的基本目标^[12]。

风力机的功率也可以由风力机的转矩与其旋转角速度的乘积来表示,其关系为:

$$P = T\omega \quad (3)$$

根据式(2,3)可以推导出风力机输出转矩为:

$$T = \frac{P}{\omega} = \frac{\rho v^2 \pi R^3 C_p}{2\lambda} \quad (4)$$

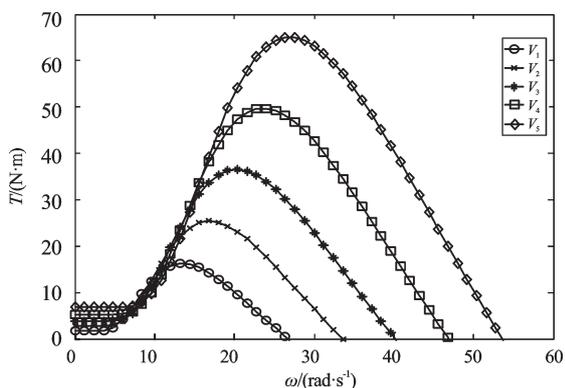
根据式(1~4),可以绘制出风力机在不同风速下的 $T-\omega$ 以及 $P-\omega$ 特性曲线,如图2所示。图2中曲线簇所对应风速的关系为: $v_1 < v_2 < v_3 < v_4 < v_5$ 。

由 $T-\omega$ 曲线可以得知风力机在不同风速下的转矩变化情况,为直流电机模拟风机的转矩特性提供了转矩给定值;由 $P-\omega$ 曲线可以得知风机在不同风速下的期望转速,为永磁同步发电机的最优转速跟踪提供了参考值,为最大风能捕获的实现提供了理论依据。

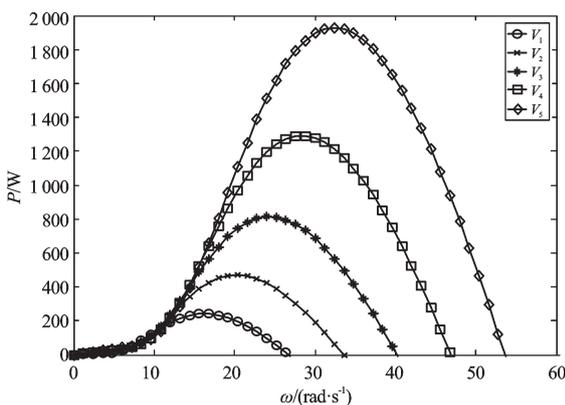
2 模拟平台构建及控制实现

2.1 风机模拟平台

本研究所所述的风力发电模拟平台的结构如图3(a)所示,实际的模拟平台如图3(b)所示。风力发电模拟平台主要由上位机、PLC、驱动器、机械传动部分、传感器等组成。PLC选用嵌入式PC CX1010,是模拟



(a) 风力机 T-ω 特性曲线



(b) 风力机 P-ω 特性曲线

图2 风力机特性曲线

系统的核心,它与模拟系统的其他部分密切联系。控制程序由基于PC的控制软件TwinCAT PLC开发,通过以太网TCP/IP协议与以太网总线控制器CX1010通信。CX1010通过总线端子和通讯模块实现对模拟平台的运动控制和状态监测功能。同时,系统通过KingView组态软件实现了PLC的可视化控制。

其中,模拟系统的主电路由“直流电机+永磁同

步发电机+不控整流桥+Buck变换器+负载”组成。直流电动机使用4 kW的他励直流电动机,额定转速1 500 r/min,调速装置采用欧陆590全数字直流调器;发电机使用额定功率为3 kW的永磁同步发电机,额定转速280 r/min;Buck变换器的功率器件选用IGBT,其驱动芯片采用SG3525。PLC的总线端子模块包括数字量输入输出端子模块、模拟量输入输出端子模块等。一方面,PLC通过欧陆590实现对直流电机的电枢电流闭环控制,使直流电机运行在给定的转矩值上;另一方面,通过TwinCAT PLC中的PID运算,调节Buck电路IGBT导通与关断的占空比从而调节负载的功率,负载的功率改变时,永磁同步电机的转速也将发生改变,这样实现了PLC对电机的转矩转速控制。

2.2 直流电机模拟风力机的直接转矩控制

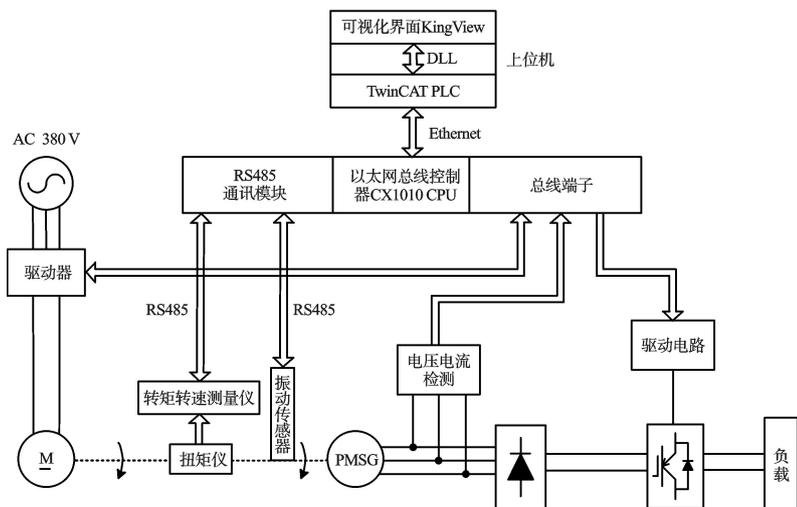
直流电动机的功率特性和转矩特性与风力机类似,并且其模型简单,调速和控制性能优越,是进行风力机仿真模拟的有效工具,因此该实验选用他励直流电动机来模拟风力机。

对风力机的模拟常见的方法有电枢电压控制、直接功率控制和直接转矩控制等^[13]。稳态下直流电机的模型:

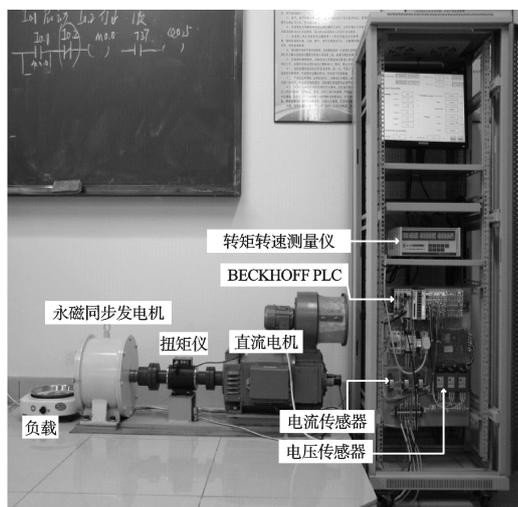
$$\begin{aligned}
 U_d &= E + i_d R_a \\
 E &= C_e \varphi n \\
 T_d &= C_t \varphi i_d
 \end{aligned}
 \tag{5}$$

式中: C_e —电动势常数, C_t —转矩常数, T_d —直流电机电磁转矩, φ —直流电机主磁通, n —直流电机转速, i_d —电枢绕组电流。

由式(5)分析可知,控制 i_d 即可控制 T_d ,从而达到模拟风力机机械转矩的目的。实验中采用欧陆590全数字直流调节器,构成晶闸管—电动机系统。但这一



(a) 风力发电模拟平台结构



(b) 风力发电模拟平台

图3 风力发电模拟平台组成

系统经典的控制方式为转速-电流双闭环调节方式,电路原理图如图4所示,转速调节器的输出当做电流调节器的输入,再用电流调节器的输出去控制电力电子变换器 UPE,这种控制方式的电流环给定是由转速环的输出决定,无法实现对电枢电流的直接控制,不满足直接转矩控制对系统的要求。因此需要对双闭环控制模式进行必要的改进,改进后的调节系统欧陆590的外部接线如图5所示。

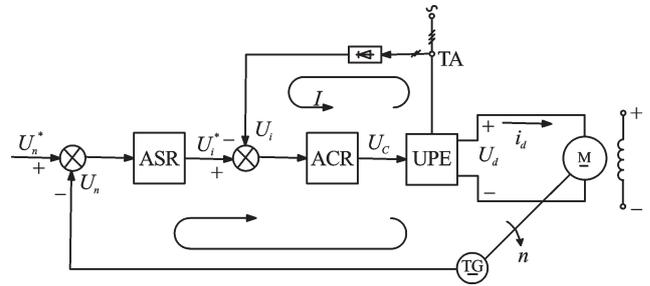


图4 转速、电流双闭环直流调节系统

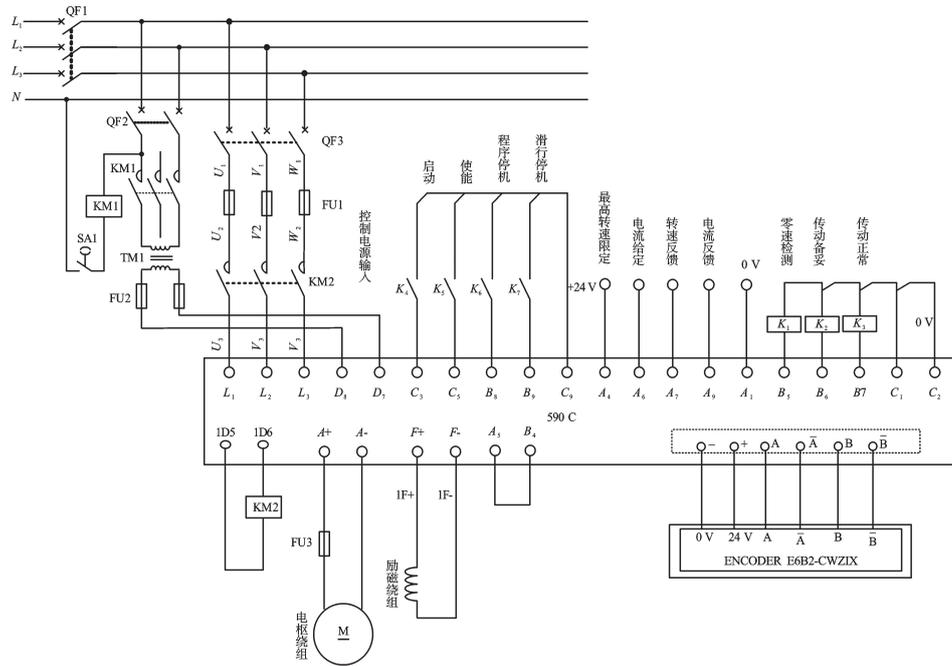


图5 欧陆590电气原理图

图5中, L_1 、 L_2 、 L_3 为欧陆590工作电源输入端, D_8 、 D_7 为控制电源输入端,端子 C_3 为系统启动停止输入。未改进时, B_3 和 A_6 短接,系统工作在双闭环模式下, A_4 为转速给定,此时电流限幅由转速环的输出决定,不满足电枢电流直接控制的要求。改进后,将端子 B_3 和 A_6 断开,此时欧陆590对电机的控制方式仍属于速度环操控方式,但电流钳位由人为调节,通过端子 A_6 施加电流给定信号,可实现电流单独控制,进而实现了对电机的直接转矩控制;而速度调节仍可通过端子 A_4 的给定值实现,只是其作用是限制电机的最高转速,避免了电流控制模式下突然断载引起的电机飞车。可见改进后的欧陆590接线方式实现了直流电机对风力机转矩特性的模拟。

2.3 永磁同步发电机转速控制

对于永磁同步发电机部分的转速控制,本研究采用TwinCAT PLC控制器工具箱中的PID功能块实现。该功能块如图6所示。

其中, fSetpointValue 为设定值,对应风力发电机

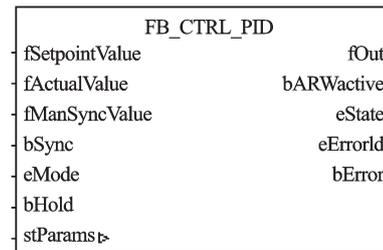


图6 PID功能块

系统为相应风速下PMSG的期望转速 ω_{opt} , fActualValue 为实际值,对应为反馈回来的发电机转速,在参数 stParams 中可设置PID控制器的 k_p 、 k_i 、 k_d 以及对PID的输出进行限幅,在参数 eMode 中可以选择功能块的操作模式, fOut 为PID的输出。

结合平台的硬件条件,如图3(a)所示,风力发电模拟平台发电机侧输出的三相交流电经过不控整流之后,经Buck电路进行调节。控制部分经过PID运算后,经PLC的总线端子模块输出占空比给定信号到Buck变换器的驱动芯片SG3525作为调制波,SG3525输出的PWM波经过电平转换以后,触发Buck电路IG-

BT的导通和关断。即PID通过调节PWM波的占空比从而调节负载的功率,最终使PMSG稳定运行在期望转速 ω_{opt} 处。

3 MPPT控制策略与实验分析

3.1 MPPT控制策略

实现风力发电系统的MPPT控制是风机的最终目的,最常用的方法是利用最佳叶尖速比(TSR)法来实现MPPT。TSR的基本思想是:当风速变化时,通过测量风速和风力机固有特性计算出此时的最佳转速,并实时调整发电机转速使其始终运行于该最佳转速,从而实现最大风能追踪^[14]。因此本研究将TSR方案应用于模拟平台,验证所搭建的模拟平台实现最大风能追踪的可行性。

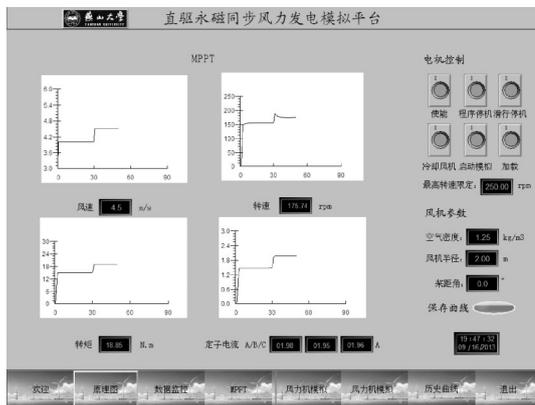
根据所选的 C_p 模型计算出最优的叶尖速比 λ_{opt} 和最优功率系数 $C_{p,max}$,将它们作为固定值设置在控制器PLC中,由上位机主控系统给定的风速和风力机参数可计算出PMSG的期望转速 w_{opt} 。一方面,通过控制发电机输出功率来控制转速;另一方面,根据建立的风力机模型计算风力机在期望转速 w_{opt} 下输出的转矩值并作为直流电机的转矩指令,实现直流电机模拟风机的目的。通过PLC对电机的转速、转矩加以控制,使得电机在变化的风速下能够追寻到风机的最大功率点,实现MPPT。

3.2 实验分析

为了验证模拟平台实现MPPT的可行性,笔者进行了实验研究。根据模块化的编程思想,PLC采用结构文本(ST)编程语言编写了模拟系统的程序,包括信号采集子程序、电机控制子程序、MPPT子程序以及通讯子程序。并使用KingView组态软件,开发了人机交互界面。KingView组态界面如图7所示,在图7(a)中,用户可以输入不同的风力机参数与环境参数来进行实验,具有良好的实用性与可操作性;对模拟平台的运行状态的实时监控如图7(b)所示,可以方便获取各变量的实时值。

实验中模拟的风力机为定桨距风力机,桨距角为 0° ,风轮半径2 m,空气密度 1.25 kg/m^3 。给定风速 v 从 $4 \text{ m/s} \sim 5 \text{ m/s}$,每30 s变化一次,每次增加 0.5 m/s 。上位机根据风速以及风力机参数计算出当前风力机的期望转速 n_{opt} 和风力机在最大功率点 P_m 处的气动转矩 T_m ,作为电机的给定信号。各变量如表1所示。实验曲线如图8所示。

直流电机的转矩跟踪波形如图8(a)所示。对照表1可知,风速变化时,直流电机能快速跟踪驱动转矩



(a) MPPT界面



(b) 模拟平台运行状态监测界面

图7 KingView组态界面

表1 不同风速下的各变量指令

t/s	$v/(m \cdot s^{-1})$	$T_m/(N \cdot m)$	$n_{opt}/(r \cdot min^{-1})$	P_m/W
0	4	14.89	154.70	241.28
30	4.5	18.85	174.04	343.54
60	5	23.27	193.37	471.25

指令,实现了风力机的转矩特性模拟。永磁发电机最优转速跟踪实验波形如图8(b)所示,风速突变时,驱动转矩突增,但是占空比不能突变导致了转速超调,经过PID对占空比的调节后,PMSG很快稳定地运行在期望转速处,说明使用该PID功能块能使永磁同步发电机在风速变化时准确快速地跟踪期望转速。直流电机的最大功率跟踪实验波形如图8(c)所示,对比表1中风力机在不同风速下输出的最大功率值,可知风速变化时,直流电机快速地追踪了风力机的最大功率点,动态地实现了最大风能捕获,同时负载的功率也达到最大值,验证了提出的叶尖速比(TSR)控制方案的有效性。发电机输出的定子电流和定子电压的有效值分别如图8(e)、8(f)所示。PID功能块的输出和占空比变化曲线分别如图8(g)、8(h)所示,实验中根据转速的给定值和反馈值自动调整PID的输出,从而改变占空比,调整模拟平台的转速。

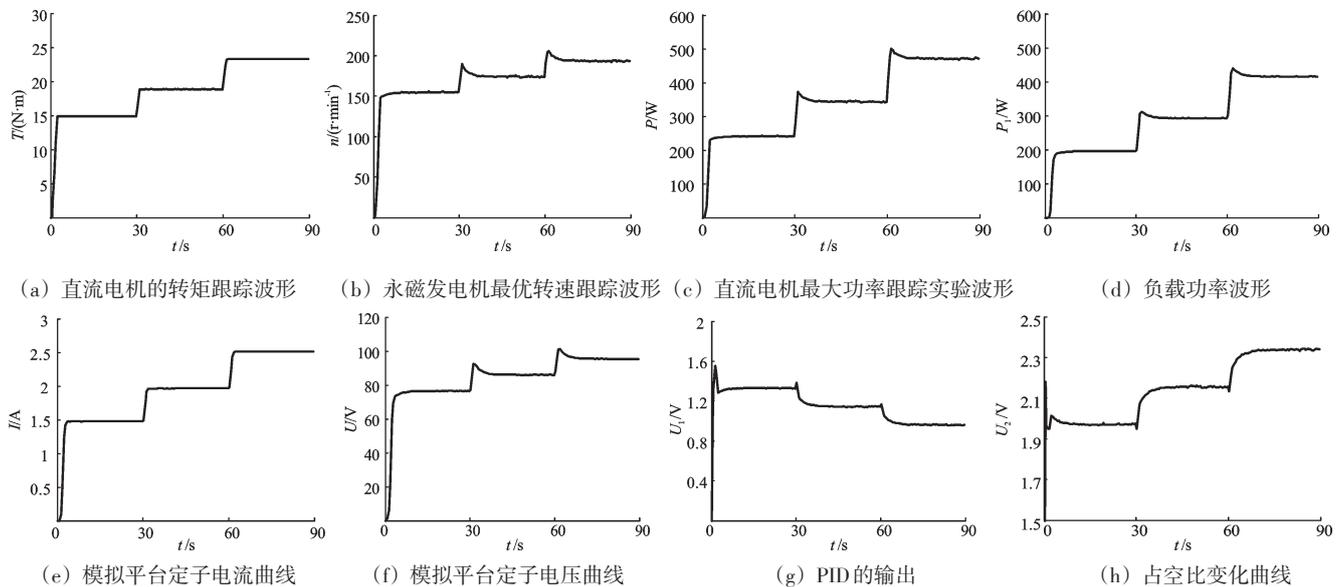


图8 风力机模拟实验波形

4 结束语

针对风力发电系统的风能利用问题,本研究建立了有效的模拟实验平台,完成了以下工作:

(1) 使用直流电机与永磁同步发电机搭建了风力发电模拟平台,选用BECKHOFF PLC作为主控制器,并基于PC控制在模拟平台上同时完成了实时控制、可视化、通信等多种功能。

(2) 在对直流电机模拟风机的控制方式上,对欧陆590直流调速器提出了新的接线方式,给出了直流电机的直接转矩控制策略,实现了风力机的转矩特性模拟。

(3) 上位机根据主控系统的风速指令,给出最佳转速指令,使用PLC的PID功能块,通过调节Buck电路的占空比,实现了永磁同步发电机的最佳转速追踪,进而实现了风力机的最大风能捕获,为基于PLC的风力发电系统最大风能捕获控制策略的实际应用提供了实验依据,并为先进控制算法的实验研究提供了有效平台。

参考文献(References):

[1] 费智,符平. 我国风电发展的态势分析与对策建议[J]. 科技进步与对策, 2011, 28(10): 65-68.

[2] GERTMAR L, LILJESTRAND L, LENDENMANN H. Wind energy powers-that-be successor generation in globalization [J]. *IEEE Trans. Energy Conversion*, 2007, 22

(1): 13-28.

[3] 盛双文. 大型风力发电机组中央控制系统的研制[D]. 北京:中国科学院电工研究所, 2000.

[4] 刘福才,刘吉斯,李江艳. 基于异步电机的小功率风机特性动态模拟器研究[J]. 电力电子技术, 2012(9): 102-105.

[5] 许燕灏. 基于DSP的风力发电模拟系统的研究[D]. 广州:华南理工大学电力学院, 2005.

[6] 金利祥,张德华,陈绍磊,等. 基于PLC的风力发电机组控制系统研究[J]. 机电工程, 2012, 29(2): 188-191.

[7] 江秀汉,汤楠. 可编程序控制原理及应用[M]. 2版. 西安:西安电子科技大学出版社, 2003.

[8] 徐亮,李作武,钟顺金. 基于PLC的冲压力控制系统[J]. 兵工自动化, 2013, 32(4): 64-66.

[9] BECKHOFF. *New Automation Technology* [EB]. BECKHOFF, 2011.

[10] 郑康,潘再平. 变速恒频风力发电系统中的风力机模拟[J]. 机电工程, 2003, 20(6): 40-43.

[11] LI Hui, SHIKL S M. Development of a unified design, test, and research platform for wind energy systems based on hardware in the loop real-time simulation [J]. *IEEE Trans. Industrial Electronics*, 2006, 53(4): 1444-1151.

[12] 刘其辉. 变速恒频风力发电系统运行与控制研究[D]. 杭州:浙江大学电气工程学院, 2005.

[13] RABELO B, HOFMANN W, GLUCK M. Emulation of the static and dynamic behaviour of a wind-turbine with a DC-machine [J]. *Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference*, 2004(35): 2107-2112.

[14] 叶杭冶. 风力发电机组监测与控制[M]. 北京:机械工业出版社, 2011.

[编辑:洪炜娜]

本文引用格式:

任丽娜,杨娟霞,刘吉斯,等. 基于PLC和直流电机的风力发电模拟平台试验研究[J]. 机电工程, 2014, 31(6): 769-774.

REN Li-na, YANG Juan-xia, LIU Ji-si, et al. Experimental research of wind power simulation platform based on PLC and DC motor [J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2014, 31(6): 769-774.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>