

# 基于原型控制器的风力发电仿真平台应用研究

吴吉祥<sup>1</sup>, 杨晓冬<sup>1</sup>, 徐 瑞<sup>2</sup>

<sup>1</sup>盐城工学院, 电气工程学院, 江苏 盐城

<sup>2</sup>连云港市人民检察院, 检查技术部, 江苏 连云港

收稿日期: 2022年11月18日; 录用日期: 2023年1月22日; 发布日期: 2023年1月29日

## 摘 要

为减少风力发电系统实际工况中各种不确定因素对产品研发、算法验证造成的负面影响, 提出以原型控制器构建风力发电仿真平台, 以实现在实验室条件下对风力发电系统相关产品的研发、算法的验证等。介绍了基于快速控制原型(Rapid Control Prototyping, 简称RCP)构建风力发电仿真平台的方法, 实验结果表明, 在基于快速控制原型的风力发电仿真平台上进行风力发电实验, 能够方便灵活的监视风力发电系统运行参数及波形, 有利于风力发电系统的进一步研究。

## 关键词

风力发电系统, 原型控制器, 仿真平台

# Application Research of Wind Power Simulation Platform Based on Prototype Controller

Jixiang Wu<sup>1</sup>, Xiaodong Yang<sup>1</sup>, Rui Xu<sup>2</sup>

<sup>1</sup>School of Electrical Engineering, Yancheng Institute of Technology, Yancheng Jiangsu

<sup>2</sup>Inspection Technology Department, Lianyungang People's Inspection Institute, Lianyungang Jiangsu

Received: Nov. 18<sup>th</sup>, 2022; accepted: Jan. 22<sup>nd</sup>, 2023; published: Jan. 29<sup>th</sup>, 2023

## Abstract

In order to reduce the negative impact of various uncertain factors on product development and algorithm verification in the actual working conditions of wind power generation system, a wind power generation simulation platform based on prototype controller is proposed to realize the development of wind power generation system related products and the verification of algorithms

under laboratory conditions. This paper introduces the method of constructing wind power generation simulation platform based on Rapid Control Prototyping (RCP). The experimental results show that the wind power generation experiment on the wind power generation simulation platform based on RCP can conveniently and flexibly monitor the operation parameters and waveforms of wind power generation system, which is conducive to the further research of wind power generation system.

## Keywords

Wind Power Generation System, Prototype Controller, Simulation Platform

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

风力发电机组工作范围广泛，通常工作在风能资源充足的空旷场地，比如海边、草原、戈壁滩等地。因此，风力发电系统作为一个参数变量多、结构复杂、非线性的不确定系统，在保证平稳运行的情况下，还要应对温差大、湿度大、风沙等恶劣的气候条件，这就增加了工程师和科研工作者对风力发电系统的研究难度。

随着现代仿真技术的发展与成熟，使在实验室环境下研究风力发电系统成为了可能。现如今的仿真技术主要有纯仿真技术和半实物仿真技术两种。纯仿真技术是控制器与控制对象都是虚拟仿真的；半实物仿真技术又分为两类，一是系统由虚拟的控制器和实际的对象构成，另一种是实际的控制器和虚拟的对象构成，称为硬件在回路仿真[1]。科研工作者科研可针对不同的研究内容选择不同的仿真方式，在实验室环境下进行研究且避免了构建完整风力发电系统所带来的成本和场地的过多投入。

快速控制原型即是一种半实物仿真技术，由虚拟的控制器和实际的对象构成，可有效避免采用实际控制器而产生的研发周期长、可靠性差等问题。在快速控制原型中实现对系统的控制过程时，只需要将在 MATLAB 搭建的 Simulink 控制算法模型下载到快速控制原型控制器中。虚拟的控制器和实际的对象使得开发人员能够不断的将自己的控制算法作用在对象中，验证控制算法的可行性，并通过系统的负反馈信息不断完善，可有效缩短开发周期。快速控制原型在风力发电、光伏发电等新能源方面有着广阔的应用前景。

本文将基于 DSP 的快速控制原型应用到直驱式风力发电系统中。首先，说明了基于 DSP 的快速控制原型的构成，给出了快速控制原型的基本控制框图。然后，介绍了基于快速控制原型的风力发电仿真平台的搭建，分析了直驱式风力发电系统运行原理在快速控制原型仿真平台上的实现。最后，在构建的风力发电系统半实物仿真平台上，通过 RCP 软件实时监控风力发电系统运行参数及波形，验证了以快速控制原型搭建风力发电系统的可行性，为风力发电系统进一步深入研究提供了一套有效的实时仿真和半实物测试平台[2]。

## 2. 基于快速控制原型的风力发电系统仿真平台

快速控制原型控制器能够通过 MATLAB 中编写的 Simulink 控制算法与实际的对象进行模拟量和数字量的信息交互，从而完成对硬件设备控制。基于 DSP 的快速控制原型基本控制框图如下图 1 所示：

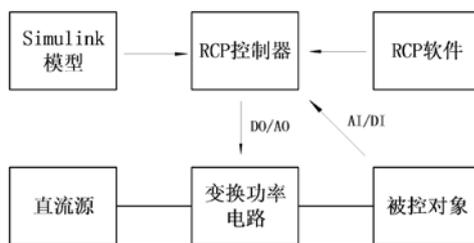


Figure 1. Basic control block diagram  
图 1. 基本控制框图

基于快速控制原型的直驱风力发电仿真平台系统主要设备有矢量变频器、三相异步调速电机、永磁发电机、背靠背变流器、RCP 控制器、监控部分及风速调速系统，其中矢量变频器、监控部分及风速调速设备包括在综控柜中，硬件框图如下图 2 所示：

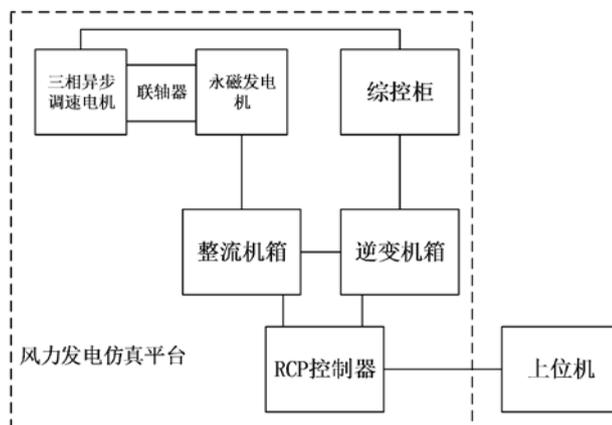


Figure 2. Simulation platform of wind power generation system based on rapid control prototype  
图 2. 基于快速控制原型的风力发电系统仿真平台

1) 主要设备功能

- ① 矢量变频器和三相异步调速电机来模拟实际的风力机；
- ② 三相异步调速电机利用联轴器带动永磁直驱发电机发电；
- ③ 可控整流器的交流输入连接发电机定子交流输出，将发电机发出的三相交流电整流成直流电；
- ④ 并网逆变器直流输入连接可控整流器直流输出，将整流器输出的直流电逆变为符合并网要求的三相交流电，馈入主网[3]；

⑤ 工控机、显示器、上位机应用软件等设备组成监控系统，监控和记录矢量变频器、可控整流器、并网逆变器等设备的数据；

⑥ 风速调速系统设备，主要目的就是实现定桨距角变速恒频的最大发电功率追踪。

2) 自然风模拟控制

风力发电系统运行在实际工况下时，自然风带动风车叶片转动，进而促使发电机发电，其中接收到的风速总是处在动态变化中的。在实验室环境下，通过变频器改变三相异步电动机的转速来模拟自然风带动风车叶片的转动。变频器变频调速为三相异步电机调速最常用的调速方式，三相异步电动机转速公式如下：

$$n = \frac{60f}{p(1-s)} \quad (1)$$

从上式可见, 转速和频率  $f$ , 电动机的极对数  $p$  以及转差率  $s$  有关, 改变转速可以通过改变频率  $f$ 、电动机的极对数  $p$  以及转差率  $s$  来实现。通过改变极对数  $p$  以及转差率  $s$  的方法, 变极调速电机造价高、无法做到无极调速, 变转差调速, 调速范围窄, 能耗高。变频调速是将工频电源变换成各种频率的交流电源, 以实现电机的变速运行的调速方法, 具有调速效率高, 调速过程中几乎没有附件损耗, 调速范围宽, 机械特性较硬, 精度高, 能兼作启动设备等特点。

变频器输出频率的大小决定了三相异步电机转速的大小, 三相异步电机转速就越快, 三相永磁同步发电机也随之转的越快, 进而发出的电能就越大, 经过并网逆变器馈入主网的电能也就越多。因此通过改变变频器的输出频率, 改变并网功率值。整个过程来模拟实际风力发电。

### 3) 功率最大跟踪

变频器驱动三相异步电动机有两种模式。一种是标量控制, 即 V/F 模式。这种模式无法实现发电功率的最大跟踪, 但发电机转速越快, 发电功率越大。另一种是矢量控制, 即转矩控制。这种模式的逆变器根据特定的转矩发送到电机。当电机运行到最优转速时, 发电功率可以达到最大值。

风力机吸收功率  $P_M$  为:

$$P_M = \frac{1}{2} \rho C_p(\lambda, \beta) \pi R^2 V_m^3 \quad (2)$$

其中,  $P_M$  为风力机从风中得到的功率;  $\rho$  为空气的密度;  $R$  为叶片半径,  $V_m$  为风速,  $C_p(\lambda, \beta)$  是风能利用系数, 有关叶尖速比  $\lambda$  和桨距角  $\beta$  关系的函数, 其近似经验表达式可描述为[4]

$$C_p(\lambda, \beta) = c_1 \left( \frac{c_2}{\lambda_i} - c_3 \beta - c_4 \right) \exp\left(\frac{-c_5}{\lambda_i}\right) \quad (3)$$

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \quad (4)$$

叶尖速比  $\lambda$  表达式为

$$\lambda = \frac{R\omega_r}{V_m} \quad (5)$$

式中  $\omega_r$  为风力机机械角速度。

在桨距角一定时, 为了获得最大风能利用系数, 即获得最大功率, 需要使风力机运行于最佳叶尖速比, 这时风力机的转换效率达到最高, 因此, 对于不同的风速, 风力机应该相对不同风速有不同的运行转速, 以实现随风能的最大利用率。

在上位机上设置风速值, 就可以获得最佳转速值和对应的转矩值, 将转速值发给可控整流器, 转矩值发给变频器, 这样就实现了功率最大跟踪, 即 MPPT 功能。

### 4) 背靠背变流柜

图 3 为永磁直驱风力发电系统, 其中 PWM 整流器以及 PWM 逆变器两部分组成背靠背变流器。PWM 整流器为本系统中核心模块之一, 将永磁同步发电机定子端输出的交流电压, 经可控整流模块整流后输出直流。再将此直流送给本系统另外一个核心模块 PWM 逆变器输入端, PWM 逆变器再将此直流逆变成符合并网条件的交流电, 将能量馈入主网。

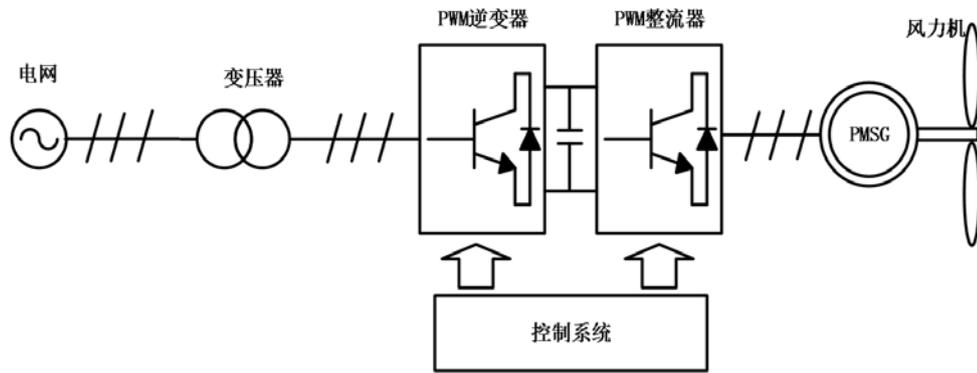


Figure 3. Permanent magnet direct-drive wind power system  
图 3. 永磁直驱风力发电系统

在变流器运行过程中，机侧 PWM 变流器基于转子磁链定向，通过控制机侧 PWM 变流器来实现发电机功率因数的调节和发电机转速的控制；网侧 PWM 变流器基于电网电压矢量定向，通过控制网侧 PWM 变流器实现有功/无功解耦控制和逆变并网控制。机侧 PWM 变流器和网侧 PWM 变流器都可以实现对风能的最大跟踪以及对直流母线电压的控制。当机侧 PWM 变流器对风能进行最大跟踪，通过控制风速来控制永磁直驱风力发电机获得最佳转速时，网侧 PWM 变流器则需要对直流母线电压进行控制。相反，当机侧对直流母线电压进行控制时，网侧 PWM 变流器要对风能进行最大跟踪，实现对并网电流和永磁直驱风力发电机转速的控制[5]。

### 3. 实验与分析

直驱风力发电实验仿真平台采用 2.2 kw 三相异步电机、2 kw 三相永磁发电机、5 kw ABB 矢量变频器、2 kW 风机背靠背整流逆变柜，其中三相异步电机采用 2 对级，额定转速 1460 r/min (存在转差)。永磁同步发电机额定频率为 100 HZ，4 对级，额定转速为 1500 r/min。

在风力发电实验仿真平台做直驱风力发电实验，图 4 为 simulink 逆变并网算法模型图。

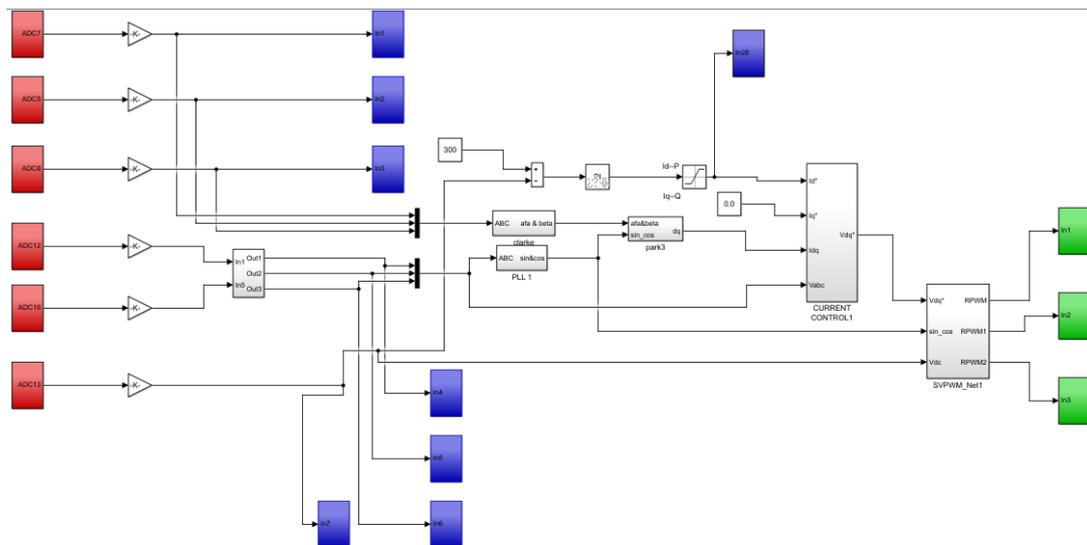
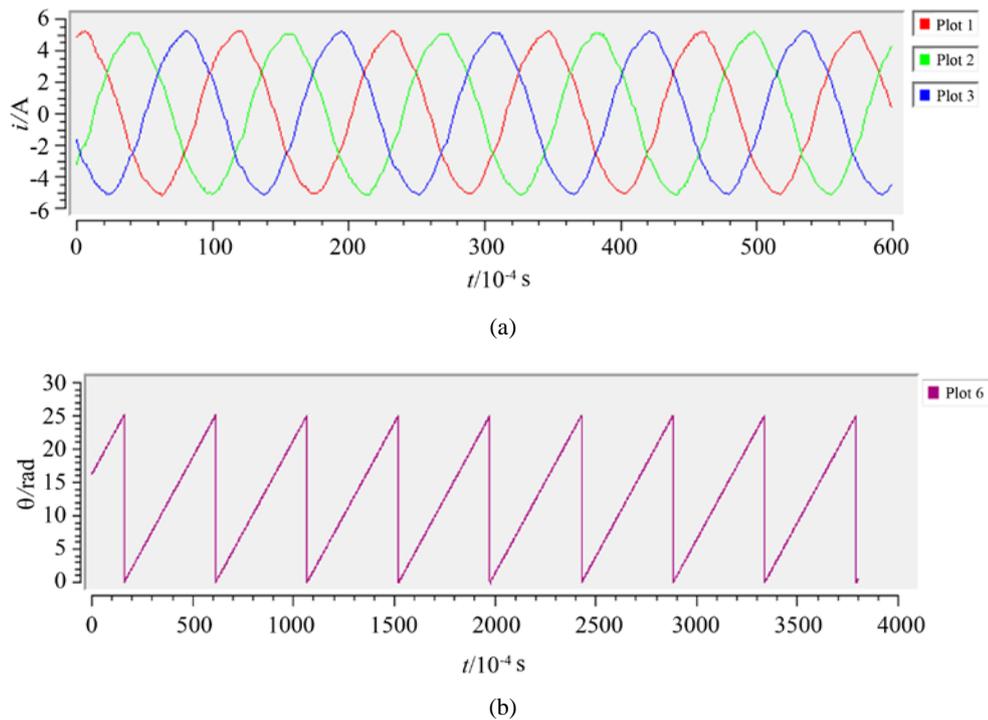


Figure 4. Inverter grid simulink algorithm model  
图 4. 逆变并网 simulink 算法模型

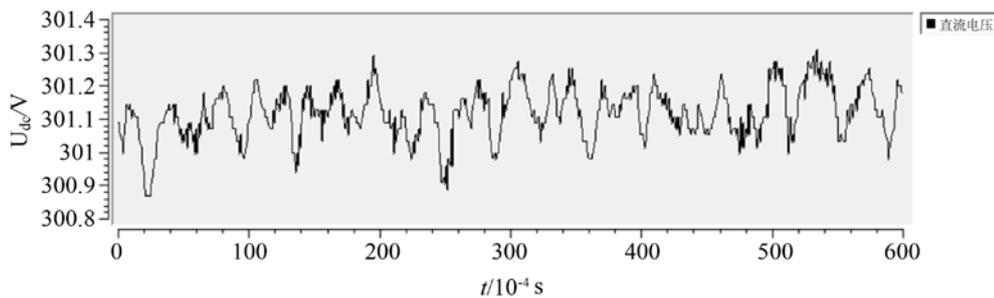
逆变并网模型采用电压空间矢量控制(SVPWM)算法,其中彩色的模块为硬件驱动模块,即 simulink 模型与硬件或者上位机监控连接的模块。图中红色模块为 ADC 采集模块,与控制器硬件对接,采集三相电网电压、三相并网电流,直流电压、直流电流等模拟量,进行有功、无功解耦,外环控制电压、内环控制电流,最终计算输出 3 组互补对称 PWM 波形,驱动开关器件,从而实现并网逆变器功能;图中蓝色模块为示波器模块,与 RCP 监控软件示波器控件对接,在 RCP 软件中的示波器控件里显示对应的波形。

如图 5(a)所示,电机在 1140 r/s 转速值运行下,电机侧三相电流  $I_m = 5$  A,如图 5(b)实时监测的发电机转子位置角。



**Figure 5.** (a) Three-phase current of generator; (b) Generator rotor position angle  
**图 5.** (a) 发电机三相电流; (b) 发电机转子位置角

由图 6 可以看出直流母线电压稳定在 300 V 左右,实现了直流侧的无能量损耗。



**Figure 6.** DC voltage acquisition waveform  
**图 6.** 直流电压采集波形

如图 7 所示，逆变并网电流  $I_m = 4 \text{ A}$ ，电压  $U_m = 100 \text{ V}$ ，电压电流波形平滑，谐波较少。

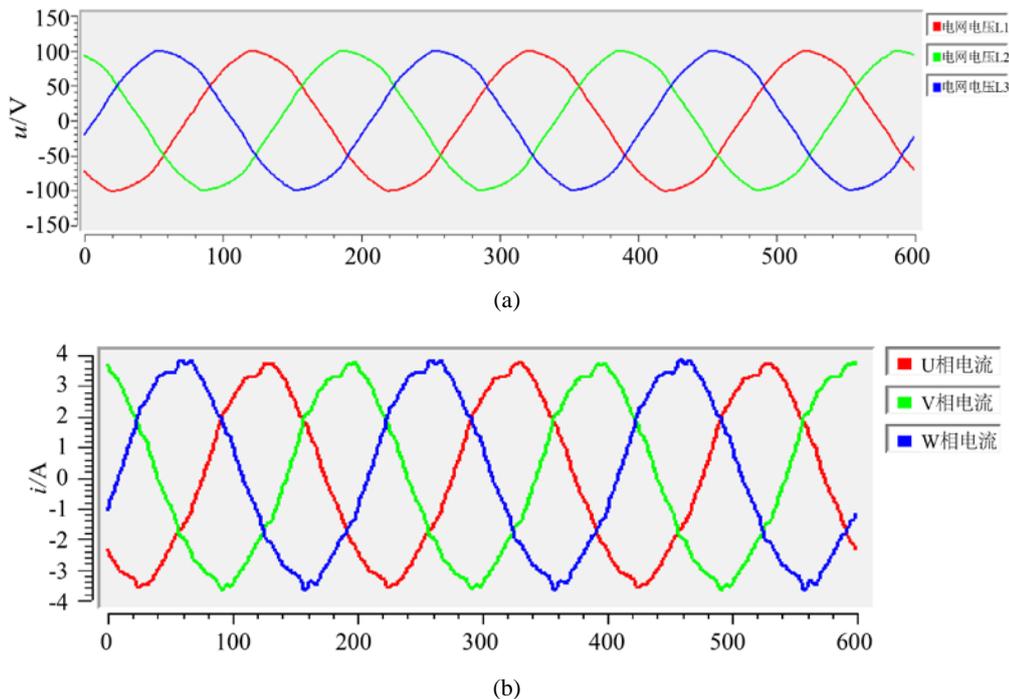


Figure 7. Grid current voltage waveform  
图 7. 并网电流电压波形

从上述直驱式风力发电实验可以了解到以快速控制原型构建风力发电仿真平台的可行性，其应用主要有以下几个方面。

① 测试系统控制策略

基于快速控制原型搭建的仿真平台能够降低现场测试、验证成本，能够随时优化设计参数，提高控制策略的验证效率。

② 故障诊断

基于快速控制原型搭建的仿真平台能够实时监测系统的运行状态，掌握各参数的变化情况。在对风力发电系统某一器件进行故障诊断时，可以在线重置对应信号来模拟故障，再采集故障信息，进行故障诊断。

③ 容错控制

系统的容错控制是继系统发生故障后为保证系统继续稳定运行而采取的手段，能够降低故障发生后引起的经济损失，增加系统维修的时间。在实验平台上模拟故障发生后，能够及时准确掌握故障特性，制定相应的故障诊断和容错控制方法。另外，在此情况下获得的故障信息未受到现场复杂多变的环境因素影响，降低了故障诊断与容错控制的难度，保证了其可行性。

综上，能够在以快速控制原型搭建的风力发电实验仿真平台上进行有效的直驱风力发电实验，通过此平台，研究人员可以实时监控永磁直驱风力发电机的真实工作特性，可以缩短研究和开发周期、节省研究经费，便于对系统控制策略、故障诊断与容错控制等风力发电系统的全面深入研究，具有重要的显示意义。

## 4. 结束语

本文以基于 DSP 的快速控制原型搭建直驱式风力发电实验仿真平台。首先,概述了基于 DSP 的快速控制原型的构成,给出了快速控制原型的基本控制框图。在此基础上,介绍了利用快速控制原型完成直驱式风力发电仿真平台的搭建,分析了直驱式风力发电系统运行原理在快速控制原型仿真平台上的实现。最后,在构建的风力发电系统半实物仿真平台上进行实验,实验结果表明,基于快速控制原型搭建的风力发电系统可以有效进行风力发电实验,能够方便灵活的监视风力发电系统运行参数及波形,有利于风力发电系统的进一步研究。同时这种快速控制原型搭建便捷、快速、低成本,在控制方案验证和参数优化设计方面,大大提高了工作效率,降低了现场试验、测试和开发的成本。

## 参考文献

- [1] 丁荣军. 快速控制原型技术的发展现状[J]. 机车电传动, 2009(4): 1-3+15.
- [2] 吴爱华, 赵不脩, 茅靖峰, 申海群, 张旭东. 基于快速控制原型的风力发电半实物仿真系统[J]. 系统仿真学报, 2020, 32(3): 482-491. <https://doi.org/10.16182/j.issn1004731x.joss.18-0251>
- [3] 张翔. 直驱风力发电实验仿真平台技术方案[EB/OL]. <http://www.doc88.com/p-66816952753016.html>, 2022-11-05.
- [4] 田书, 李沙沙. 直驱式风电场对电力系统的暂态稳定性影响分析[J]. 电子测量技术, 2017, 40(1): 21-25. <https://doi.org/10.19651/j.cnki.emt.2017.01.005>
- [5] 雷慧杰, 张艳伟, 葛峰. 模拟风力发电控制系统的设计[J]. 电子制作, 2021(7): 13-16. <https://doi.org/10.16589/j.cnki.cn11-3571/tn.2021.07.004>