

基于 Bladed 和 HiGale 的风力发电系统 半实物联合仿真

唐彬伟, 陈烁[✉], 黄丽玲
(明阳智慧能源集团股份公司, 广东 中山 528437)

摘要: [目的] 风力发电系统结构复杂, 为实现风力发电系统的高效测试和控制算法验证, 需要对风力发电系统进行实时仿真。目前市场上缺乏国产的针对风力发电系统的实时仿真验证平台。[方法] 提出了一种基于 Bladed 和 HiGale 的半实物联合仿真系统架构, 通过 BHTM 实现了 Bladed 和 HiGale 的实时联合仿真, 用于风力发电系统控制器的硬件在环测试。[结果] 文章以典型半直驱永磁同步电机风力发电单元为例, 搭建主要由风场模型、机械传动和电气模型构成的硬件在环模型, 利用联合仿真平台针对并网控制、变桨控制和低电压穿越 3 种工况下硬件的性能进行测试。[结论] 实验结果一方面验证了并网控制和变桨控制算法的有效性; 另一方面也证明了该平台可以在风力发电系统的开发测试阶段提供可靠的技术支持, 对于提高系统研发效率、节省研发成本具有重要的工程意义。

关键词: 风力发电系统; Bladed; HiGale; 联合仿真; 控制算法

DOI: 10.16516/j.ceec.2024-266

文章编号: 2095-8676(2025)

CSTR: 32391.14.j.ceec.2024-266

中图分类号: TK8; TM614

Hardware-in-loop Simulation of a Wind Turbine Based on Bladed and HiGale

TANG Binwei, CHEN Shuo[✉], HUANG Liling
(Mingyang Smart Energy Group Limited, Zhongshan 528437, Guangdong, China)

Abstract: [Objective] The structure of the wind power generation system is complex, and in order to achieve efficient testing and control algorithm verification of the wind power generation system, it is necessary to simulate the wind power generation system in real time. At present, there is a lack of domestic real-time simulation and verification platform for wind power generation systems in the market. [Method] A hardware-in-the-loop co-simulation system architecture based on Bladed and HiGale was proposed, and the real-time co-simulation of Bladed and HiGale through BHTM was realized for hardware-in-the-loop testing of wind power system controllers. [Result] In this paper, a typical semi-direct drive permanent magnet synchronous motor wind power generation unit is taken as an example, and a hardware-in-the-loop accompanying test model is built, which is mainly composed of wind field model, mechanical transmission and electrical model, and the co-simulation platform was used to test the performance of the hardware under three working conditions: grid-connected control, pitch control and low-voltage ride-through. [Conclusion] On the one hand, the experimental results verify the effectiveness of grid-connected control and pitch control algorithms. On the other hand, it is also proved that the platform can provide reliable technical support in the development and testing stage of wind power generation systems, which is of great engineering significance for improving system R&D efficiency and saving R&D costs.

Key words: wind turbine; Bladed; HiGale; co-simulation; control algorithms

0 引言

随着能源危机和环境问题日益严重, 可再生能源的利用和开发受到了人们的广泛关注。作为清洁

能源之一, 风能具有资源丰富、分布广泛、无污染的优势。近些年, 在政府的支持下国内风力发电行业得到了迅猛发展。然而风力发电系统复杂, 故障率和运维成本较高, 随着风力发电设备并网规模增大,

收稿日期: 2024-08-03 修回日期: 2024-12-10

基金项目: 广东省 2022 年省级促进经济高质量发展海洋六大产业专项资金项目“16 MW 级超大型海上风力发电机组及关键部件的研发”(粤自然资合[2022]25 号)

对并网运行能力也提出了更高的要求。数字建模和半实物仿真测试技术作为一种有效的研发和测试手段在减少故障率、提高测试效率方面有显著优势,在风力发电行业具有广阔的应用前景。通过搭建仿真测试平台,能够满足在实验室环境下对风力发电系统的研发测试需求,并能够对故障工况进行隔离复现,大大减少研发成本,提高机组运行效率^[1-4]。

HiGale 是一款由润科通用公司全自主研发的国产高速实时仿真系统,提供从模型搭建到实时仿真的全流程支持。该系统支持自动化的代码生成和下载功能,配有高性能处理器、丰富的风电领域专业应用板卡和实时驱动,可满足步长大于 $20\ \mu\text{s}$ 的仿真应用场景,在仿真实时性方面不仅与主流的 RT-LAB、RTDS 等系统性能相当,还在人机交互方面非常友好。HiGale 系统全自主研发的工具链具有更高的安全性和可定制化能力,保障了与其他平台的兼容性。

本文基于 HiGale 实时仿真系统,利用 HiGale 与 Bladed 联合仿真技术针对风力发电系统在不同工况下的性能表现进行测试分析。

1 风力发电系统仿真验证

由于风力发电系统中机组数量众多,且面临极端天气等各种因素干扰,因此对不同负载和工况下风力发电系统安全并网进行全面仿真变得愈发重要^[5-7]。本文提出一种基于 Bladed 和 HiGale 的半实物联合仿真系统用于风力发电系统的关键技术研究和仿真验证。

系统的功能分为 3 个层面:(1)风力发电系统的并网仿真验证,通过仿真分析系统的效率、功率因数、谐波等性能指标;(2)针对控制器的硬件闭环测试,包括控制器接口测试、功能测试;(3)风力发电系统的控制算法优化研究,利用本系统可实现风电系统控制算法优化和实时验证。平台具体验证功能可参考如下:

1) 风力发电系统并网仿真验证

通过半实物仿真系统模拟风力发电并网过程,观测风力发电系统并网电压、电流等数据,分析系统的效率、功率因数、谐波等性能指标,是否满足标准要求。

2) 低电压穿越仿真验证

电网发生故障引起电网跌落会给风力发电机组

带来一系列暂态过程。其中低电压穿越性能表示电网发生低电压故障时风力发电系统具备继续并网运行的能力,属于关键性能指标之一^[8]。通过半实物仿真模拟实验,模拟电网电压跌落过程,验证风力发电机电系统低电压穿越能力。

3) 无功功率控制研究

随着风电装机比例不断提高,风电场对电网影响越来越大,发掘风力发电机自身无功调节能力至关重要。通过半实物仿真系统,可以对风电系统的无功控制策略进行研究。

4) 控制算法研究与优化

风电系统的控制算法决定着系统的风能利用效率和系统性能的优劣^[9]。利用本文提出的半实物仿真系统可以对各种风电系统控制算法进行开发和验证,实现控制算法的优化。

5) 故障工况研究

风力发电系统并网运行时可能面临各种故障工况,例如过电压等。通过仿真平台,模拟不同故障工况,检测发电系统在故障工况下的性能指标,研究故障工况下的风力发电系统控制策略。

2 半实物仿真系统设计

本文提出的基于 Bladed 和 HiGale 联合仿真的风力发电系统半实物仿真平台完整架构如图 1 所示。利用该平台着重验证风力发电系统中主控控制器和

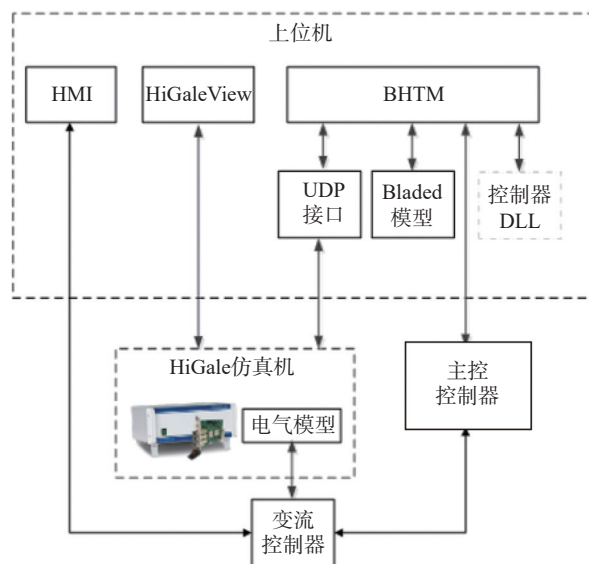


图 1 系统架构图

Fig. 1 System architecture diagram

变流控制器在并网仿真、变桨控制和低电压穿越 3 种工况下的性能表现。根据仿真步长的差异, 将动力学模型和电气模型分别进行仿真模拟。

根据联合仿真框架, 各部分组成如下:

1) Bladed 软件

Bladed 软件是 DNV GL 公司开发的用于风力发电系统中风力发电机组建模及载荷计算的软件, 该软件可针对陆上及海上风电机组进行建模仿真, 用于风电机组各部件设计及选型^[10]。在仿真平台中采用 Bladed 软件进行风机系统建模, 模型主要包括空气动力学、多体结构动力学、传动学和变桨系统。由于 Bladed 为 CFD 数值模型仿真, 运算量大, 求解周期较长, 为保证仿真实时性对模型进行了简化处理, 以 10 ms 的固定仿真步长进行运算。

2) BHTM

BHTM(Bladed Hardware Test Module)是 Bladed 软件的硬件测试模块, 专门用于 Bladed 软件的实时仿真功能^[11]。在本文的联合仿真平台中, BHTM 用于提供一个将各个硬件和软件连接在一起的实时测试框架。

3) 控制器

主控控制器硬件可以利用 BHTM 进行信息通信, 进而与 Bladed 风机模型进行信息传递。此外, 用户也可以将自定义的控制器写成 DLL 文件, 与 Bladed 进行仿真。

变流控制器通过 I/O 接口与 HiGale 仿真机进行连接, 实现对变流控制器的性能指标、容错能力等方面的测试。

4) HiGale 仿真机

HiGale 仿真机通过 UDP 接口与 BHTM 进行通

信。风力发电机的电气部分模型使用 Simulink 软件搭建, 部署在 HiGale 实时仿真机中, 可使用 20 kHz 的频率进行高速电磁暂态仿真。此外, HiGale 仿真机可以通过 I/O 调理系统与变流控制器实物进行连接, 实现变流控制器的硬件在环测试。

5) HiGaleView

HiGaleView 是 HiGale 的综合实验管理工具软件。HiGaleView 提供对实验过程的综合管理, 能够访问设备上运行的实时仿真程序并在线调试、监控、采集计算产生的数据。HiGaleView 提供多种数据监控方式, 用户可以使用图形化的交互式虚拟仪器仪表监控实时代码的运行。

3 仿真实验

3.1 仿真平台搭建

采用本文提出的 Bladed 和 HiGale 联合仿真平台对典型风力发电系统进行仿真试验。

仿真对象为参照国标《风力发电机组 电气仿真模型》(GB/T 36237—2018)规定的 4 型风力发电机基本构型——半直驱型风力发电机组基本技术构型及其电气控制系统, 如图 2^[12]所示。

风力发电系统模型主要由风场模型、机械传动模型和电气模型组成, 采用 CPU+FPGA 的混合模型分配方案, 如图 3 所示。

本文以典型半直驱永磁同步电机风力发电单元为例, 设计基于 Bladed 和 HiGale 的硬件在环联合仿真平台。实时仿真平台的结构图如图 4 所示。其中, 本次实验仿真平台中主控控制器为硬件实物, 通过 BHTM 接口与 Bladed 进行通信, 接收风机运行状态和风速信号, 向风机模型发送变桨指令, 实现变桨控

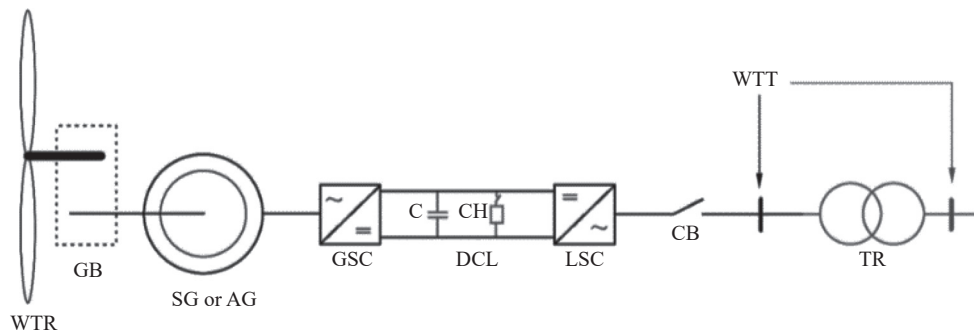


图 2 4 型风力发电机组的主要电气和机械部件^[12]

Fig. 2 Main electrical and mechanical components of type 4 wind turbine generator system^[12]

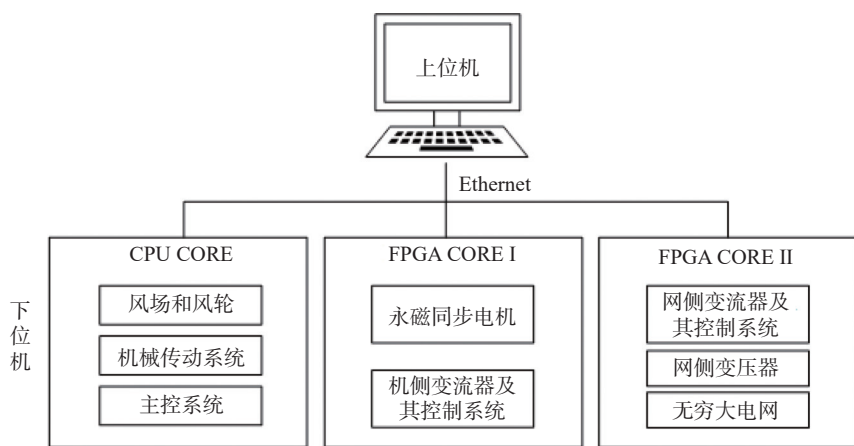


图3 风力发电系统模型架构

Fig. 3 Wind power system model architecture

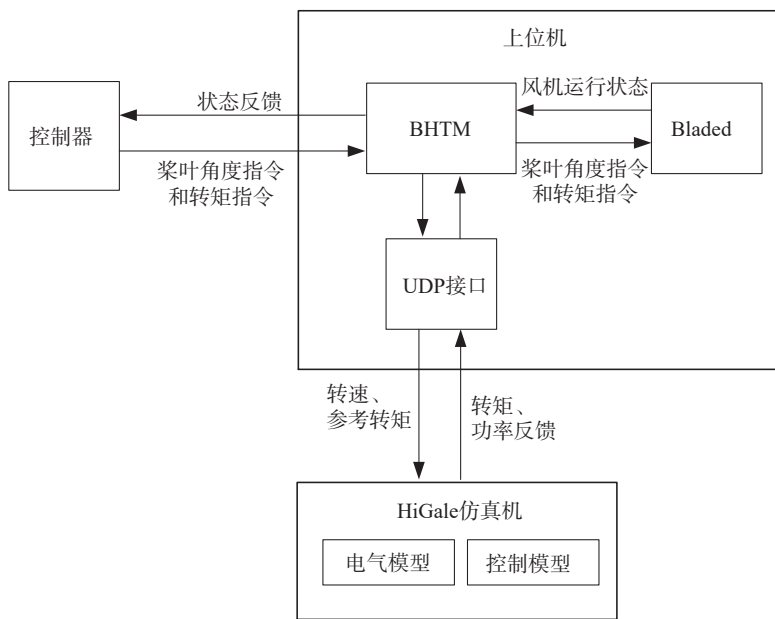


图4 实时仿真平台变量传递

Fig. 4 Real time simulation platform variable transfer

制。发电机电路部分及变流控制系统均采用模型仿真,部署在HiGale仿真机中,电气部分拓扑图如图5所示。HiGale仿真机通过UDP与BHTM进行通信,间接与主控控制器进行信息交流。HiGale仿真机向BHTM传递发电机电磁转矩和输出功率,BHTM向HiGale仿真机发送电机转速和参考电磁力矩,以此对风电机组的转速和功率进行调节。

本次仿真实验中,Bladed风力发电机组的动力学仿真频率为100 Hz,HiGale仿真机的电气模型仿真频率为20 kHz。BHTM和HiGale仿真机之间通信是异步的,通信周期为1 ms。HiGale以1 ms为周

期发送数据,同时Bladed以10 ms为周期接收数据。模型中部分关键参数设置如表1所示。

使用BHTM定义和执行测试用例程序,并记录结果。图6为Bladed软件中仿真结果及其曲线查看界面。

3.2 仿真结果分析

在本实验中使用的风速为风场中风机传感器实际测量的风速数据。实验测试的风速如图7所示。

变桨控制的核心在于通过改变叶片的桨矩角,即叶片弦线与旋转平面之间的夹角,来调整叶片对风能的捕获能力^[13]。桨矩角的变化会直接影响叶片

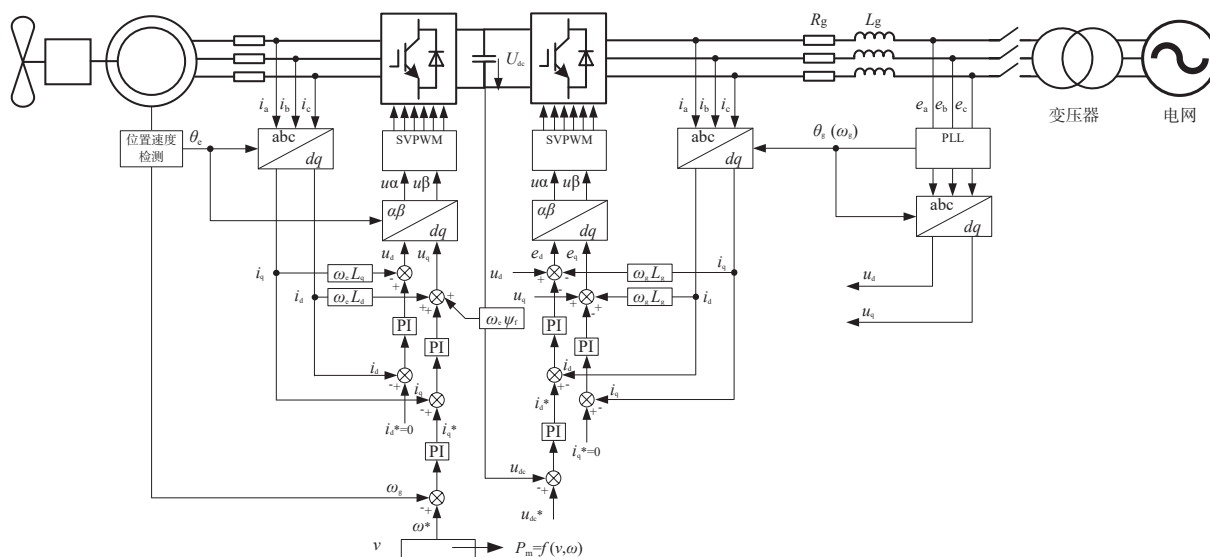


图 5 电气部分仿真拓扑图

Fig. 5 Electrical simulation topology diagram

表 1 模型部分关键参数设置

Tab. 1 Some key parameters settings for the model

参数名称	数值
基准电压/kV	36.75
短路容量/MVA	150
电网频率/Hz	50
原边线电压(RMS)/kV	37
副边线电压(RMS)/V	690
电机额定功率/kW	423
额定转速/rpm	231
中间电压目标值/kV	1.1

的气动特性, 包括升力和阻力, 进而控制风轮捕获的气动转矩和气动功率。在风力发电机启动前, 叶片的桨矩角通常设置为较大的角度(如 89°), 以减少启动阻力, 使风机能够顺利启动。一旦风力发电机接收到启动信号, 变桨控制系统会逐步减小桨矩角, 使叶片更加垂直于风向, 从而开始捕获风能并驱动风轮旋转^[14]。在风机稳定运行阶段, 变桨控制系统会根据实时风速、发电机转速、输出功率等参数, 动态调整桨矩角, 使发电机能够持续、稳定地输出额定功率^[15]。图 8 为桨矩角实际值与期望值随时间的变化曲线, 从图中可以看出, 叶轮桨矩角开始为 89° , 风机启动后, 受控制器控制, 叶轮开始变桨, 桨矩角开始减小, 同时风力发电机转子逐步加速, 风力发电机开

始发电。投入发电后, 变桨系统控制桨矩角稳定在 10° 左右。

图 9 为发电机转速的变化曲线。随着主控控制器将桨矩角调小, 使叶片更加垂直于风向, 捕获风能增加, 发电机转速增加。当增加至额定转速时, 发电机转速稳定在额定值附近, 不再增加。600 s 后的速度波动是由于风速变化导致。

主控控制器根据当前风速和风机状态, 给出风机的电磁转矩参考值, 以实现风机的转矩控制和功率调节。图 10 为电磁转矩变化曲线, 其中黑色实线为主控系统发出的转矩参考值, 红色虚线为发电机模型的实际转矩变化曲线。从图中可以看出, 运行在 HiGale 仿真机中的电气模型能够跟随参考转矩进行实时响应, 表明 HiGale 实时仿真机能够在当前仿真频率下实现高速实时仿真。同时, 也验证了 HiGale 和 Bladed 联合仿真的有效性。

图 11 和图 12 分别为发电机三相电压和三相电流的变化曲线, 从图中可以看出随着发电机转速增加, 机侧电压不断增加。在 420 s 附近由于发电机转矩的急剧增加使得发电机电流和电压迅速上升, 发电机定子电流动态响应迅速。

图 13 为直流侧母线电压变化曲线, 从图中可以看出直流侧母线电压基本稳定在要求值, 说明网侧变流器具备维持直流侧电压稳定的能力。图 14 为变流器网侧电流变化曲线, 可以看出当发电机转速

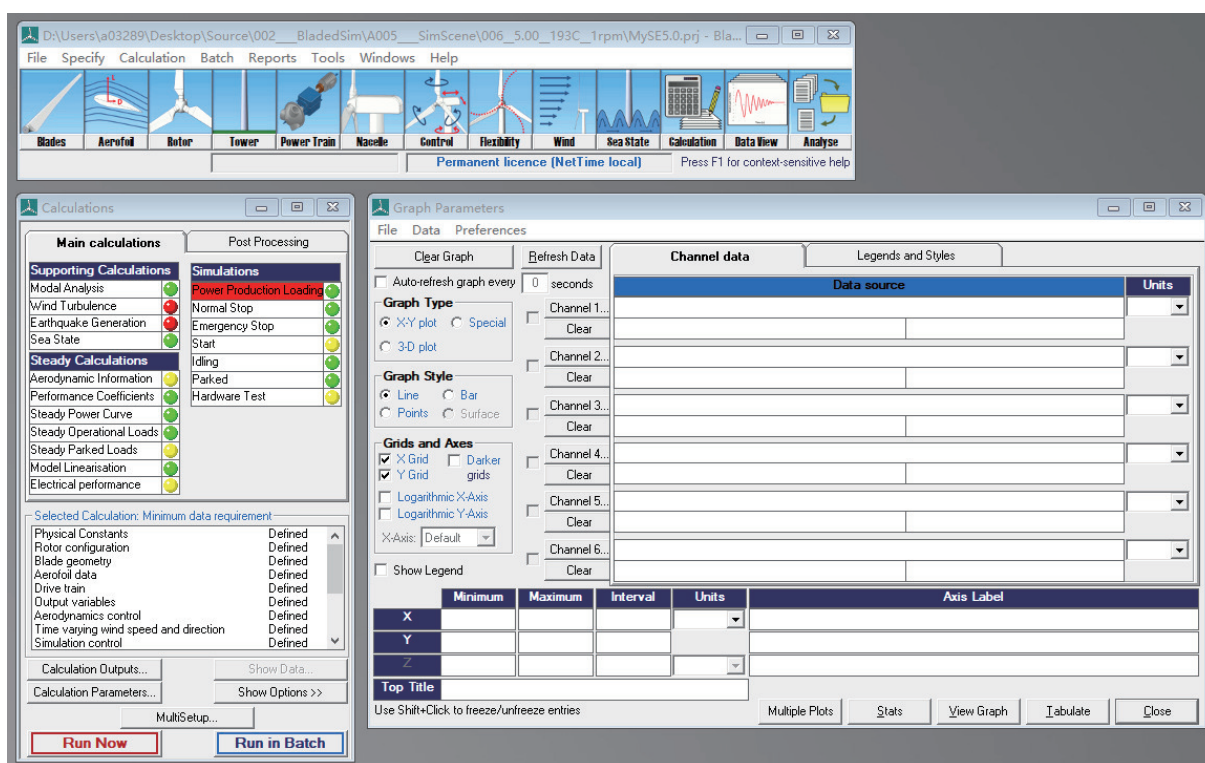


图 6 Bladed 仿真结果及其曲线查看界面

Fig. 6 Bladed simulation results and curve viewing interface

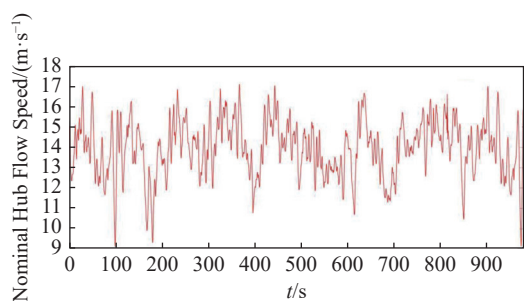


图 7 风速变化曲线

Fig. 7 Wind speed variation curve

较小时,网侧电流几乎无波动,当转速增大后,由图 10 可以看出发电机组输出转矩显著增大,网侧电流幅值增加。

基于上述实验平台,根据《风力发电机组 故障电压穿越能力测试规程》(GB/T 36995—2018,)模拟低电压穿越控制算法稳定性测试,如图 15 所示。

关键测试步骤如下^[16-18]:

- (1) 断开旁路开关 CB1,投入限流阻抗;
- (2) 闭合短路开关 CB2,投入短路阻抗,在测试点产生电压跌落;
- (3) 断开旁路开关 CB2,退出短路阻抗;

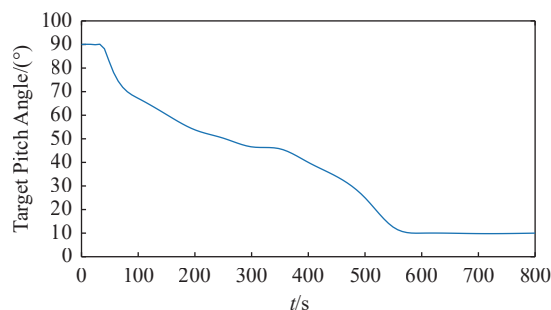
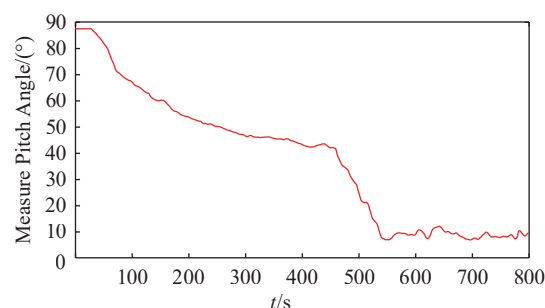


图 8 桨矩角变化曲线

Fig. 8 Pitch angle variation curve

- (4) 闭合旁路开关 CB1,退出限流阻抗,电网电压恢复正常。

设定如下仿真条件^[19-20]:

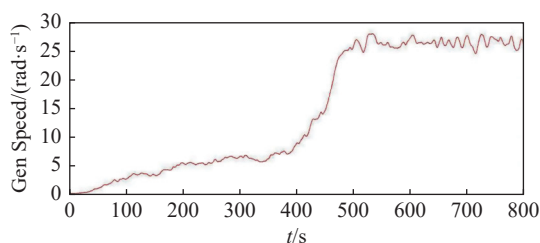


图 9 给定转速曲线

Fig. 9 Speed curve

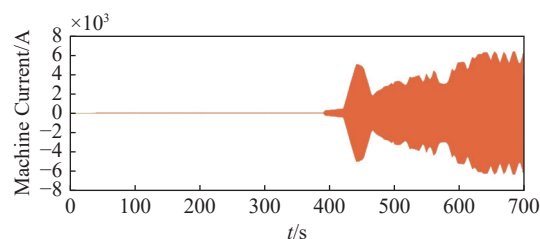


图 12 发电机电流仿真曲线

Fig. 12 Generator current simulation curve

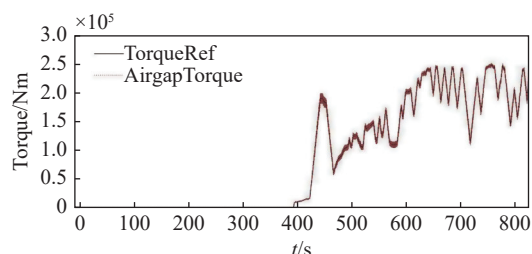


图 10 转矩曲线

Fig. 10 Torque curve

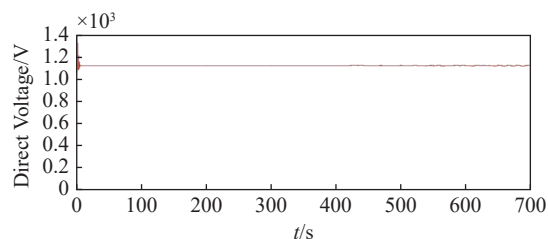


图 13 直流侧母线电压仿真曲线

Fig. 13 Intermediate voltage simulation curve

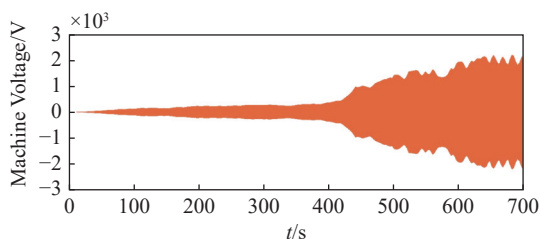


图 11 发电机电压仿真曲线

Fig. 11 Generator voltage simulation curve

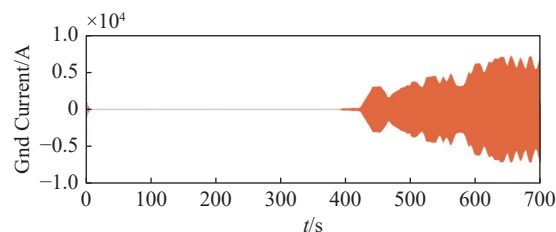


图 14 网侧电流仿真曲线

Fig. 14 Simulation curve of grid side current

- (1) 假定并网点发生三相对称电压跌落;
- (2) 假定电压跌落至 0.2 pu, 持续 625 ms, 如图 16 所示;
- (3) 假定电压跌落期间网侧变流器提供的无功电流一定。

图 17 和图 18 分别是无 Crowbar 电路保护情况下和有 Crowbar 电路保护情况下低电压穿越过程中风力发电系统中风力发电机输出功率、直流母线电压、网侧无功功率、短路阻抗三相电流等关键参数仿真结果。从图中可以看出如果没有 Crowbar 保护电路, 在电压跌落期间直流母线电容电压会迅速上

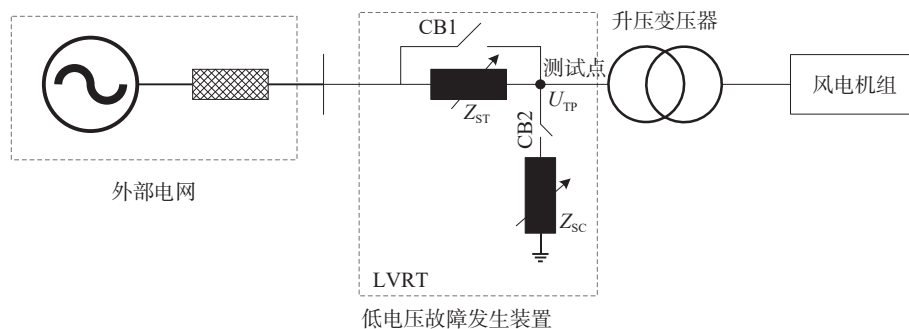


图 15 故障电压穿越能力测试框图

Fig. 15 Block diagram of fault voltage crossing ability test

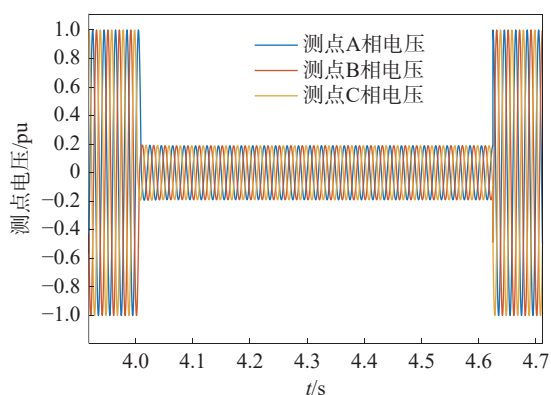


图 16 电压跌落模拟

Fig. 16 Voltage dip simulation

升,最大接近超限 50%,在现实情况下会导致电容击穿,引起安全问题,加装 Crowbar保护电路的风力发电机组则没有该问题。仿真结果与理论分析一致,联合仿真平台的可靠性得到进一步验证。

4 结论

本文针对风力发电系统,提出一种基于 Bladed 和 HiGale 的半实物联合仿真平台,以典型半直驱式永磁同步风力发电机基本构型为例,搭建主要由空气动力学模型、电气模型和控制算法模型组成的陪测模型,针对风力发电系统中主控控制器和变流控制器在风电并网、变桨控制和低电压穿越 3 种重要

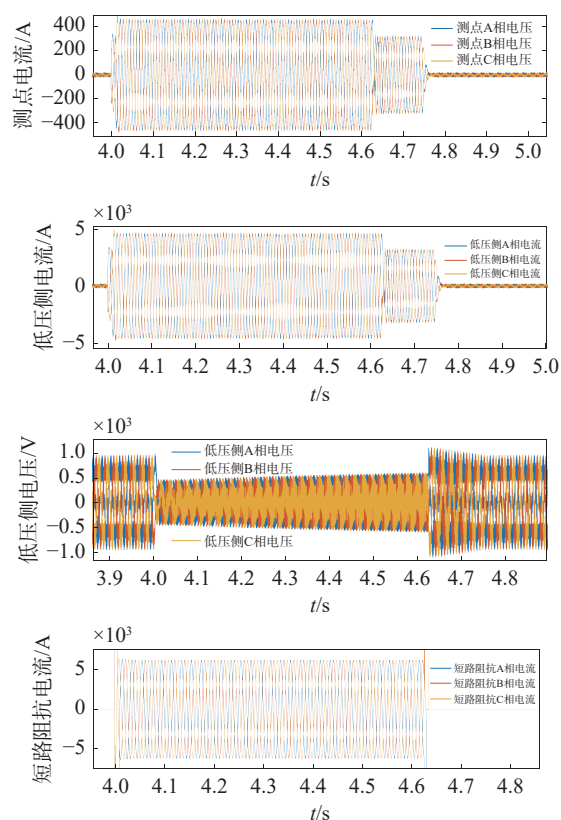
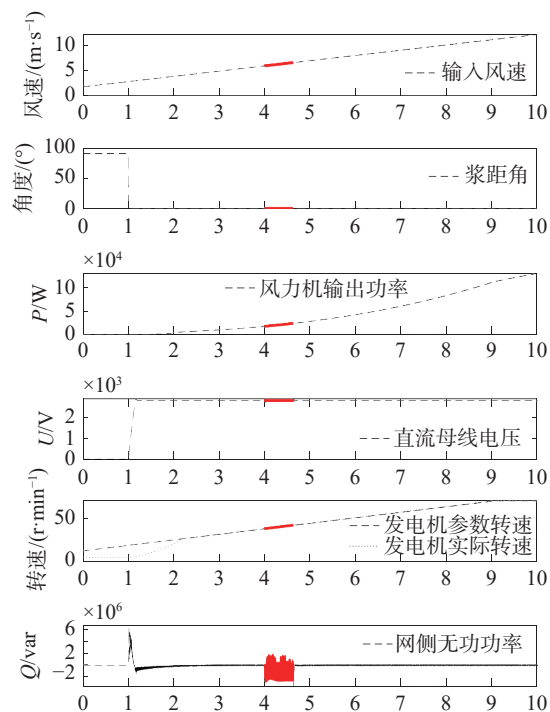
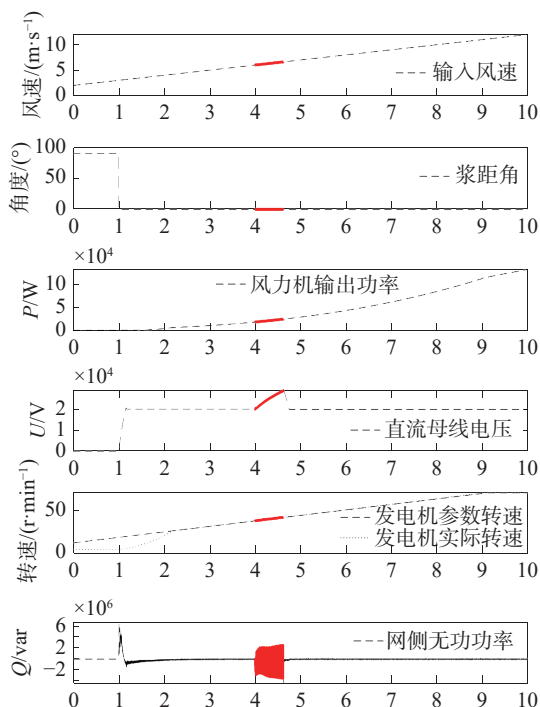


图 17 无 Crowbar 电路保护低电压穿越控制效果图

Fig. 17 Rendering of low-voltage ride-through control without Crowbar circuit protection



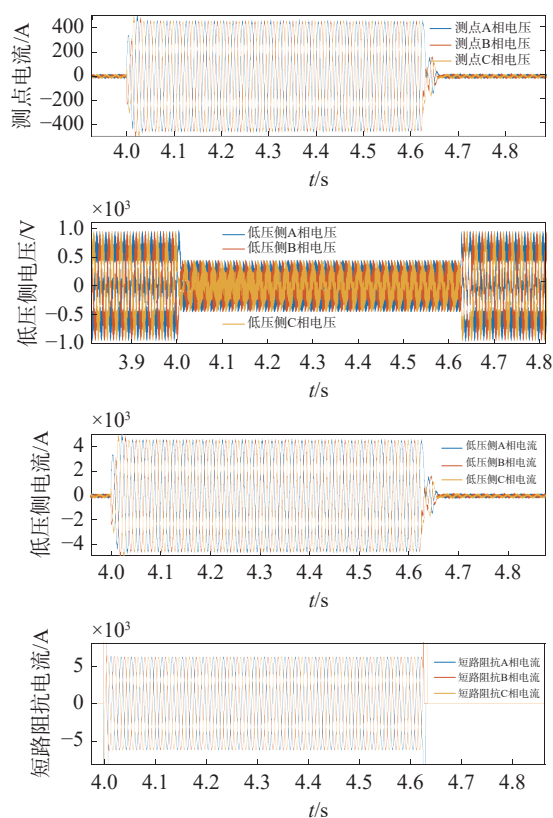


图 18 有 Crowbar 电路保护低电压穿越控制效果图

Fig. 18 Rendering of low-voltage ride-through control with Crowbar circuit protection

应用场景下的性能表现进行实验。实验结果一方面验证了并网控制和变桨控制算法的可靠性, 另一方面也证明了基于 Bladed 和 HiGale 的半实物联合仿真平台应用在风力发电系统的开发测试阶段的可靠性, 对于提高系统研发效率、节省研发成本具有重要的工程意义。

本研究存在下述不足之处: (1) 风力发电系统模型还原度需要进一步优化; (2) 控制效果有待提高, 控制算法需要改进; (3) 工况模拟不够丰富, 不能充分体现联合仿真实时平台功能特点及优势, 后续会丰富更多的测试用例。

参考文献:

- [1] 马宏忠. 风力发电机及其控制 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2016.
MA H Z. Wind turbine generator and control [M]. Beijing: China Water & Power Press, 2016.
- [2] 倪道俊, 肖瑶瑶. 海上风力发电复合筒型基础拖航稳性研究 [J]. 南方能源建设, 2021, 8(4): 26-31. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2021.04.004.
NI D J, XIAO Y Y. Research on towing stability of composite

bucket foundation for offshore wind power generation [J]. Southern energy construction, 2021, 8(4): 26-31. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2021.04.004.

- [3] 孙睿, 葛文澎, 吴迪, 等. 半直驱永磁风力发电机散热性能影响因素研究 [J]. 南方能源建设, 2023, 10(4): 71-81. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2023.04.007.
SUN R, GE W P, WU D, et al. Research on factors influencing the heat dissipation performance of semi-direct drive permanent magnet wind generator [J]. Southern energy construction, 2023, 10(4): 71-81. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2023.04.007.
- [4] 李鹏. 风力发电机组状态监测与故障诊断技术分析 [J]. 中国机械, 2024(24): 66-69.
LI P. Analysis of status monitoring and fault diagnosis technology for wind turbine generator system [J]. Machine China, 2024(24): 66-69.
- [5] 熊康, 李源, 马奔奔, 等. 海上直驱风力发电机组主轴承振动测试研究 [J/OL]. (2024-06-19) [2024-08-03]. 南方能源建设, 2024, 11: 1-12. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/44.1715.TK.20240618.0946.004.html>.
XIONG K, LI Y, MA B B, et al. Research on vibration testing of main shaft bearing of offshore direct-drive wind turbine generator system [J/OL]. (2024-06-19) [2024-08-03]. Southern energy construction, 2024, 11: 1-12. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/44.1715.TK.20240618.0946.004.html>.
- [6] 李泽英, 路发志. 风力发电设备的运行管理措施分析 [J]. 电子技术, 2023, 52(6): 210-211.
LI Z Y, LU F Z. Analysis of operation management measures for wind power generation equipment [J]. Electronic technique, 2023, 52(6): 210-211.
- [7] GE Renewable Technologies Wind B. V. Patent issued for safety structure for performing servicing operations in a wind turbine and method for its installation: USPTO 9869294 [P/OL]. (2016-03-10) [2024-08-03]. <https://patents.justia.com/patent/9869294>.
- [8] 谢楠, 杨沛豪, 何萍, 等. 基于虚拟阻抗的储能微网 VSG 控制策略研究 [J]. 南方能源建设, 2022, 9(增刊 2): 90-97. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2022.S2.015.
XIE N, YANG P H, HE P, et al. Research on VSG Control strategy for energy storage microgrid based on virtual impedance [J]. Southern energy construction, 2022, 9(Suppl.2): 90-97. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2022.S2.015.
- [9] 韩梦华. 直驱型永磁同步风力发电系统控制策略研究 [D]. 大庆: 东北石油大学, 2023. DOI: 10.26995/d.cnki.gdqsc.2023.000390.
HAN M H. Research on control strategy of direct-drive permanent magnet synchronous wind power generation system [D]. Daqing: Northeast Petroleum University, 2023. DOI: 10.26995/d.cnki.gdqsc.2023.000390.
- [10] 陈晶. 导管架式海上风电基础结构分析 [D]. 天津: 天津大学, 2014. DOI: 10.7666/d.D654203.
CHEN J. Structure analysis of support structure for jacket offshore wind turbine [D]. Tianjin: Tianjin University, 2014. DOI: 10.7666/d.D654203.

- [11] 赵浩然, 孟铃涵, 江艺宝, 等. 面向新型电力系统的实时仿真平台综述与展望 [J]. *高电压技术*, 2024, 50(10): 4611-4626. DOI: [10.13336/j.1003-6520.hve.20231802](https://doi.org/10.13336/j.1003-6520.hve.20231802).
ZHAO H R, MENG L H, JIANG Y B, et al. Overview and prospect of real time simulation platforms for new-type power systems [J]. *High voltage engineering*, 2024, 50(10): 4611-4626. DOI: [10.13336/j.1003-6520.hve.20231802](https://doi.org/10.13336/j.1003-6520.hve.20231802).
- [12] 夏长亮. 永磁风力发电系统及其功率变换技术 [J]. *电工技术学报*, 2012, 27(11): 1-13. DOI: [10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.2012.11.001](https://doi.org/10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.2012.11.001).
XIA C L. Wind energy conversion system based on PMSG and its power converter technology [J]. *Transactions of China electrotechnical society*, 2012, 27(11): 1-13. DOI: [10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.2012.11.001](https://doi.org/10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.2012.11.001).
- [13] 张永明, 史伟伟. 风力发电机低电压穿越技术发展现状 [J]. *电机与控制应用*, 2012, 39(7): 6-11. DOI: [10.3969/j.issn.1673-6540.2012.07.003](https://doi.org/10.3969/j.issn.1673-6540.2012.07.003).
ZHANG Y M, SHI W W. Wind power generator low voltage ride-through technique development [J]. *Motor and control applications*, 2012, 39(7): 6-11. DOI: [10.3969/j.issn.1673-6540.2012.07.003](https://doi.org/10.3969/j.issn.1673-6540.2012.07.003).
- [14] 耿华, 何长军, 刘浴霜, 等. 新能源电力系统的暂态同步稳定研究综述 [J]. *高电压技术*, 2022, 48(9): 3367-3383. DOI: [10.13336/j.1003-6520.hve.20221231](https://doi.org/10.13336/j.1003-6520.hve.20221231).
GENG H, HE C J, LIU Y S, et al. Overview on transient synchronization stability of renewable-rich power systems [J]. *High voltage engineering*, 2022, 48(9): 3367-3383. DOI: [10.13336/j.1003-6520.hve.20221231](https://doi.org/10.13336/j.1003-6520.hve.20221231).
- [15] 许凌峰. 变桨距风力发电机组智能控制研究 [D]. 北京: 华北电力大学(北京), 2009. DOI: [10.7666/d.D517708](https://doi.org/10.7666/d.D517708).
XU L F. Research on intelligent control for variable pitch wind turbines [D]. Beijing: North China Electric Power University (Beijing), 2009. DOI: [10.7666/d.D517708](https://doi.org/10.7666/d.D517708).
- [16] 黎作武, 贺德馨. 风能工程中流体力学问题的研究现状与进展 [J]. *力学进展*, 2013, 43(5): 472-525. DOI: [10.6052/1000-0992-13-063](https://doi.org/10.6052/1000-0992-13-063).
LI Z W, HE D X. Reviews of fluid dynamics researches in wind energy engineering [J]. *Advances in mechanics*, 2013, 43(5): 472-525. DOI: [10.6052/1000-0992-13-063](https://doi.org/10.6052/1000-0992-13-063).
- [17] 王鑫达, 张澳, 李少林, 等. 电压源型双馈风电机组低压穿越控制策略 [J]. *电机与控制学报*, 2023, 27(3): 21-29. DOI: [10.15938/j.emc.2023.03.003](https://doi.org/10.15938/j.emc.2023.03.003).
WANG X D, ZHANG A, LI S L, et al. Low voltage ride through control strategy of VSG controlled doubly fed wind turbine [J]. *Electric machines and control*, 2023, 27(3): 21-29. DOI: [10.15938/j.emc.2023.03.003](https://doi.org/10.15938/j.emc.2023.03.003).
- [18] 李思宇, 方磊, 张保平, 等. 电网末端风电场 SVG 设备高低压穿越功能改造与测试 [J]. *电工技术*, 2020(22): 56-58. DOI: [10.19768/j.cnki.dgjs.2020.22.021](https://doi.org/10.19768/j.cnki.dgjs.2020.22.021).
LI S Y, FANG L, ZHANG B P, et al. Transformation and test of high and low voltage crossing function of SVG equipment in wind farm at the end of power grid [J]. *Electric engineering*, 2020(22): 56-58. DOI: [10.19768/j.cnki.dgjs.2020.22.021](https://doi.org/10.19768/j.cnki.dgjs.2020.22.021).
- [19] 杨旻才, 余建峰, 欧阳金鑫, 等. 电网故障下永磁直驱风电机组机电暂态全过程等值建模方法 [J]. *电工电能新技术*, 2021, 40(5): 22-33. DOI: [10.12067/ATEEE2101031](https://doi.org/10.12067/ATEEE2101031).
YANG W C, YU J F, OUYANG J X, et al. Equivalent modeling method of whole electromechanical transient state of permanent magnet direct-drive wind turbine under grid fault [J]. *Advanced technology of electrical engineering and energy*, 2021, 40(5): 22-33. DOI: [10.12067/ATEEE2101031](https://doi.org/10.12067/ATEEE2101031).
- [20] 胡家兵, 贺益康. 双馈风力发电系统的低压穿越运行与控制 [J]. *电力系统自动化*, 2008(2): 49-52. DOI: [10.3321/j.issn:1000-1026.2008.02.012](https://doi.org/10.3321/j.issn:1000-1026.2008.02.012).
HU J B, HE Y K. Low voltage ride through operation and control of doubly fed induction generator wind turbines [J]. *Automation of electric power systems*, 2008(2): 49-52. DOI: [10.3321/j.issn:1000-1026.2008.02.012](https://doi.org/10.3321/j.issn:1000-1026.2008.02.012).

作者简介:



唐彬伟

唐彬伟(第一作者)

1987-, 男, 高级工程师, 电力系统及其自动化硕士, 主要从事风电并网技术研究工作 (e-mail) tangbinwei@mywind.com.cn。



陈烁

陈烁(通信作者)

1995-, 男, 工程师, 电力电子与电气传动硕士, 主要从事风电并网技术研究工作 (e-mail) chenshuo01@mywind.com.cn。

黄丽玲

1998-, 女, 助理工程师, 自动化学士, 主要从事风电并网技术研究工作 (e-mail) huangliling@mywind.com.cn。

(编辑 叶筠英)