

DOI: 10.20097/j.cnki.issn1007-9904.2024.07.004

·电网运行与控制·

## 基于ADPSS的直驱风机半实物仿真研究

张志轩<sup>1</sup>,李乐蒙<sup>2</sup>,周宁<sup>1</sup>,贾小凡<sup>3</sup>,蒋哲<sup>1</sup>,赵康<sup>1</sup>

(1. 国网山东省电力公司电力科学研究院, 山东 济南 250003; 2. 国网山东省电力公司建设公司, 山东 济南 250118;  
3. 山东大学电气工程学院, 山东 济南 250100)

**摘要:**高比例新能源设备给电网带来电源不确定性增高和转动惯量变弱等问题,通过含新能源设备精细化模型的大电网仿真可拟合设备运行控制特性,校验控制策略,提前预防电网潜在风险,有效提高电网安全性。新能源设备模型的建模精度影响大电网仿真精度,为解决新能源设备模型的精度问题,利用贴近实际设备的半实物仿真平台开展高低电压穿越等工况仿真。通过使用ADPSS(advanced digital power system simulator, ADPSS)技术,利用相关基础元件建立直流卸荷回路,结合相关两电平换流器控制策略,搭建详细的单电机双功率单元两电平直驱风机半实物仿真电磁模型,并通过直接频率控制方法优化模型,从而增强了半实物仿真的稳定性,结果比对显示,直接频率控制方法优化模型降低了仿真的波动性,可有效提升仿真的准确性。

**关键词:**半实物;直驱风机;直接频率控制;电磁仿真

中图分类号:TM461

文献标识码:B

文章编号:1007-9904(2024)07-0027-08

## Research on Semi-physical Simulation of Direct Drive Fan Based on ADPSS

ZHANG Zhixuan<sup>1</sup>, LI Lemeng<sup>2</sup>, ZHOU Ning<sup>1</sup>, JIA Xiaofan<sup>3</sup>, JIANG Zhe<sup>1</sup>, ZHAO Kang<sup>1</sup>

(1.State Grid Shandong Electric Power Research Institute, Jinan 250003, China;

2.State Grid Shandong Electric Power Construction Company, Jinan 250118, China;

3.School of Electrical Engineering, Shandong University, Jinan 250100, China)

**Abstract:** A high proportion of new energy equipment brings problems such as increased power supply uncertainty and weakened rotational inertia to the power grid. By simulating a large-scale power grid with refined models of new energy equipment, the operational control characteristics of the equipment can be fitted, control strategies can be verified, potential risks of the power grid can be prevented in advance, and the safety of the power grid can be effectively improved. In order to solve the accuracy problem of the new energy equipment model, a semi-physical simulation platform close to the actual equipment was used to carry out high and low voltage ride through and other working condition simulations. By using ADPSS technology, a DC unloading circuit was established using relevant basic components. Combined with the relevant two-level converter control strategy, a detailed semi-physical simulation electromagnetic model of a single-motor dual-power unit two-level direct-drive fan was built. And by optimizing the model through direct frequency control method, the stability of semi-physical simulation was enhanced. The comparison of results shows that the direct frequency control method optimizing the model reduces the volatility of the simulation and greatly improves the accuracy of the simulation.

**Keywords:** semi-physical; direct drive fan; direct frequency control; electromagnetic simulation

## 0 引言

为实现碳达峰碳中和目标,需要大幅度改变现

基金项目:国家自然科学基金项目“计及通信时滞和控制器参数不确定性的大规模电力系统小干扰稳定域研究”(52077126)。

National Natural Science Foundation of China “Research on the Small interference Stable Region of Large-scale Power Systems Taking Into Account Communication Time Delays and Controller Parameter Uncertainties”(52077126)。

有能源结构,针对传统的燃煤、燃油、燃气、燃料、水泥、建筑材料采取措施,以建立基于可再生能源的全面可持续发展的电网<sup>[1-3]</sup>。随着新一代技术的不断发展,“双高”电网的模拟和分析技术也在不断改进,优化了传统的可控电源,增强了可控性,降低了低频、低噪声的干扰,极大地改善整个大型电网的稳定性和安全性。因此,建立一个精确、符合实践的电力系统

的虚拟环境模拟系统<sup>[4-5]</sup>,对于提高整个系统的运行效率和安全性至关重要。半实物仿真技术,以接近现场全实物测试的形式,能够建立更加精细的电磁模型。

采用风力发电,可以大大降低传统能源的使用,从而促进经济社会的可持续发展<sup>[6-9]</sup>。其中,风机控制器起着至关重要的作用,其可以实现有效精确的功率调节、精确的电压调节、高比例精确的输出,并且还能够实现频率与电压的自我调节<sup>[10]</sup>。电力控制技术的发展已经成为必然趋势,它不仅直接决定了电力的效率、输出电力的质量,还直接影响着电力的安全。因此,探索电力控制技术的发展状态及其在电力系统中的应用至关重要<sup>[11]</sup>。

文献[12]研究了一种新的实时仿真模型,它能够有效地控制风力机和永磁同步发电机,并且采用现场可编程逻辑门阵列(field programmable gate array, FPGA)技术实现最大功率点跟踪(maximum power point tracking, MPPT)控制,从而构建出一个高效、可靠的风力发电 MPPT 快速控制原型系统。通过建立半实体仿真系统,可以有效地模拟风力发电的各种模式和状态,更加精准地评估 MPPT 控制策略的运行效果,从而更好地满足用户的需求。文献[13]针对光伏逆变器并网系统建立半实物仿真模型,通过实时数字仿真实验平台(real time laboratory, RTLAB)平台完成了软硬件交互,针对光伏逆变器和光伏电池模块进行了建模,最终应用半实物光伏系统完成了高电压穿越与低电压穿越测试,并与实际高电压穿越与低电压穿越测试数据进行误差对比,对比结果满足要求。文献[14]针对风电机组控制器搭建了半实物仿真测试平台。经过电路网络模拟与整流电路迭代,获取了三相逆变电路的准确模型,从而建立起一个可靠的电路拓扑架构,同时也提供了一种可靠的纠正错误的技术。利用 Zynq7000 软件进行 MATLAB 的离散化仿真,进一步验证了电路求解的正确性,最终利用 Simulink 软件获取相关的输出电压。文献[15]通过模块化多电平换流控制器的研究,构筑一个半实体化的模拟平台,该平台结合实时数据处理器(real time digital simulation, RTDS)与物理控制器,以及相应的模拟试件,以满足需求,并对稳态和暂态过程进行了验证,但其仿真模型不支

持用户自定义。以上研究均未涉及双电机双功率单元直驱风机,未对电机控制进行优化。

为了检验模型的可靠性,采用半实物仿真技术,对风电机组控制器进行功能测试,并建立电力系统全数字仿真装置(advanced digital power system simulator, ADPSS)硬件测试平台,以便构建双电机双功率单元两电平的直驱风机半实物仿真电磁模型。针对稳态功率波动问题,采用直接频率控制方法优化电机模型,降低波动。最终完成直驱风机高低穿半实物数据的获取。

## 1 ADPSS 仿真平台

### 1.1 平台构成

半实物仿真平台由服务器、小步长仿真装置、物理接口装置、录波仪、控制器等构成<sup>[16]</sup>。

服务器是计算核心,将用户提交的电磁程序与物理装置连接,内置 Linux 系统,具备多线程计算能力。

小步长仿真装置是仿真平台的核心部件,可以支持电力电子设备 1 kHz 以上的仿真频率,仿真平台支持 64 节点仿真规模,核心计算模块的常数矩阵最大维数为 64,变量向量的最大维数为 64。

物理接口箱提供服务器和被测控制器实物之间的物理接口,一般包括模拟量输入、模拟量输出、数字量输入、数字量输出等接口。

### 1.2 工作原理

半实物电磁仿真模型与外部物理装置的连接如图 1 所示。

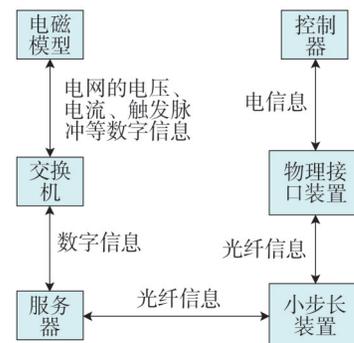


图1 半实物仿真平台结构

Fig.1 Semi-physical simulation platform structure

在 ADPSS 软件中完成被测控制器、电网和其他

配套设备的模型搭建,并将半实物电磁仿真模型提交至仿真机群服务器。仿真机群服务器的主控板光纤接口与小步长装置的光纤网卡通过光纤相连,实现仿真机群与小步长装置之间的数据交互。通过使用光纤接口,小步长装置可以与物理接口箱进行数据交换,从而实现仿真机群之间的信息传输。这些接口箱可以与功率放大器、外部设备和录波仪相连。经过多次迭代,仿真平台的电磁仿真模型与外部物理设备之间形成了一个可靠的信息传输渠道。

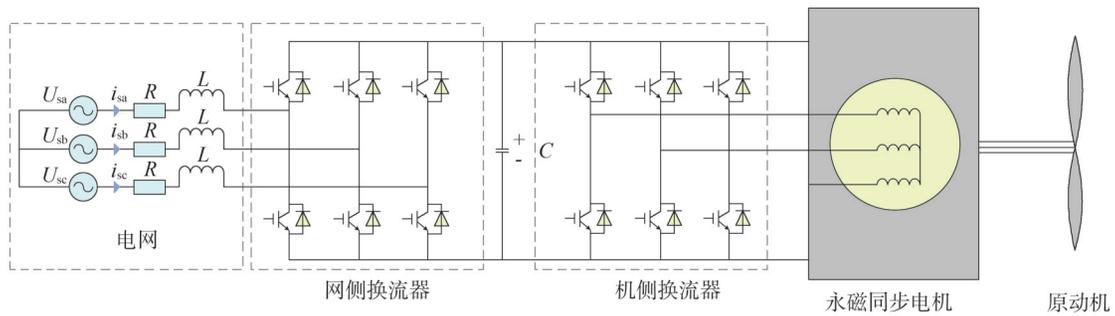


图2 风机拓扑

Fig.2 Turbine topology

## 2.2 Chopper电路

低电压穿越过程中风机受到电网电压跌落影响,风机转子电流过流,进一步导致直流母线电容  $C$  过充,增大了击穿风险,为了规避低穿过程中的以上风险,利用 Chopper 这类硬件来辅助风机实现低电压穿越<sup>[19-20]</sup>。

工作原理:风机采样模块采集到的转子电流过流或直流母线电压过压时,转子侧变流器停止工作,同时 Chopper 的绝缘栅双极晶体管 (insulate gate bipolar transistor, IGBT) 开关受控导通,通过 Chopper 电阻消耗低穿期间的能量。

Chopper 的结构如图 3 所示,由 Chopper 电阻和二极管并联后再与 Chopper 开关串联,反并联二极管可辅助通过多余转子电流,提高过电流能力。由图 3 可知,Chopper 保护通过控制 Chopper 开关来调整电阻的投切,从而有效地抑制风机在故障情况下产生的冲击电流。为了达到稳定的直流母线电压,Chopper 保护采用了延滞环节,即当电压超出预设值时,会投入电阻,当电压低于预设值时,会切断电阻,从而达到稳定的直流母线电压。

## 2 直驱风机

### 2.1 拓扑结构

直驱永磁风电机组由低速多极直驱永磁同步发电机 (permanent magnet synchronous generator, PMSG)、脉宽调制 (pulse width modulation, PWM) 变流器、直流环节构成,其拓扑结构如图 2 所示<sup>[17-18]</sup>。在传统的直驱永磁风电机组基础上补充了直流卸荷回路 (Chopper),该回路与直流侧电容并联。

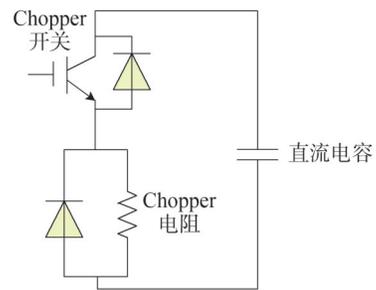


图3 Chopper保护结构

Fig.3 Chopper protective structure

### 2.3 动力机

发电机和风轮是直接相连,所以直驱风机的动态特性为

$$J \frac{d\omega}{dt} = T - T_{em} \quad (1)$$

式中: $J$ 为风轮的转动惯量; $T$ 为风轮的气动转矩; $T_{em}$ 为发电机的电磁转矩; $\omega$ 为角速度。

风轮气动转矩  $T$  为

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

式中: $\rho$ 为空气密度; $R$ 为风轮叶片半径; $C_p$ 为风能利

用系数; $\beta$ 为桨距角; $\lambda$ 为叶尖速比; $v$ 为风速。

风能利用系数  $C_p$  为

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

式中: $P$ 为捕获功率; $S$ 为风穿越面积。

由式(3)可得

$$P = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 \left( \frac{2\pi R n}{\lambda} \right)^3 C_p(\beta, \lambda) \quad (4)$$

式中: $n$ 为风轮的转速。

当动力机运行在最佳叶尖速比  $\lambda_{opt}$  时,对应的风能利用系数  $C_p$  存在最佳功率系数  $C_{pmax}$ 。

### 2.4 永磁同步电机

以永磁体 N 极轴线为  $d$  轴,超前  $d$  轴方向  $90^\circ$  为  $q$  轴建立同步转动坐标轴。永磁同步电机的定子电压公式为

$$\begin{cases} L_d \frac{di_d}{dt} = u_d - r i_d + \frac{\pi}{\tau} v L_q i_q \\ L_q \frac{di_q}{dt} = u_q - r i_q - \frac{\pi}{\tau} v \psi_{PM} + \frac{\pi}{\tau} v L_d i_d \end{cases} \quad (5)$$

式中: $L_d$ 、 $L_q$ 分别为电枢电感  $d$ 、 $q$  轴分量; $r$ 为定子电阻; $\tau$ 为极距; $v$ 为动子运动速度; $\psi_{PM}$ 为永磁体有效磁通。

转子运动方程为

$$m \frac{dv}{dt} = \frac{\pi}{\tau} \psi_{PM} i_q - F_L + F_d + f \quad (6)$$

式中: $m$ 为动子质量; $F_L$ 为电机负载阻力; $F_d$ 为外部扰动力; $f$ 为摩擦力。

### 2.5 PWM 换流器

全功率换流器直驱风机正常运行时应具备以下目标约束条件:最大功率跟踪、高风速功率限制、直流母线电压保持恒定、风机向网侧输出功率和功率因数可控。

换流器的控制参数:有功功率、无功功率、直流母线电压和电机定子交流电压。提出一种控制方法:在机器侧控制电源的功率,在网络侧控制直流电压,并使用换流器来分离电源的功率。通过以上方法使电源的功率因数得到控制,并使得搭建的系统具备跟踪最优的风力发电效率。

#### 2.5.1 机侧换流器控制策略

通过机侧换流器,可以有效地将直驱风机的有功功率和无功功率分离,使其轴线与转子磁链的方

向保持一致,固定电机转子磁场方向,设置同步坐标系的  $d$  轴即同步坐标系  $d$  轴与转子磁链  $\psi$  方向相同。

电机电压方程为

$$\begin{cases} u_{sd} = \frac{d\psi_{sd}}{dt} + R_a i_{sd} - \omega \psi_{sq} \\ u_{sq} = \frac{d\psi_{sq}}{dt} + R_a i_{sq} + \omega \psi_{sd} \end{cases} \quad (7)$$

式中: $u_{sd}$ 、 $u_{sq}$ 分别为风机  $d$  轴电压分量和  $q$  轴电压分量; $R_a$ 为永磁风力发电机每相绕组的电阻; $i_{sd}$ 、 $i_{sq}$ 分别为  $d$  轴电流分量和  $q$  轴电流分量; $\psi_{sd}$ 、 $\psi_{sq}$ 分别为定子绕组磁链的  $d$  轴分量和  $q$  轴分量; $\omega$ 为电气角频率。

式(7)中定子磁链  $\psi_s$  为

$$\begin{cases} \psi_{sd} = L_{sd} i_{sd} + \psi_f \\ \psi_{sq} = L_{sq} i_{sq} \end{cases} \quad (8)$$

式中: $L_{sd}$ 、 $L_{sq}$ 分别为风力发电机定子电感  $d$  轴分量和  $q$  轴分量; $\psi_f$ 为转子永磁体在定子中产生磁链幅值。

式(8)代入式(7)可得

$$\begin{cases} u_{sd} = R_a i_{sd} - \omega L_{sq} i_{sq} + \psi_{sd} \\ u_{sq} = R_a i_{sq} + \omega L_{sd} i_{sd} + \omega \psi_f + \psi_{sq} \end{cases} \quad (9)$$

由式(9)可知, $d$ 轴和 $q$ 轴存在耦合: $\omega L_{sd} i_{sd}$ 和 $\omega L_{sq} i_{sq}$ ,故而采用电流内环解耦控制,控制如图4所示。

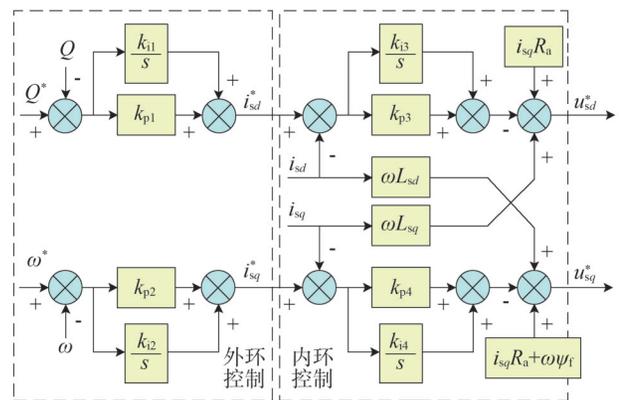


图4 机侧控制

Fig.4 Machine side control

#### 2.5.2 网侧换流器控制策略

通过网侧换流器,可以有效地控制直流母线的电压和功率因数,其中,将同步坐标系的轴与电网电

压的方向保持一致,从而达到稳定的输出。

根据基尔霍夫电压定律,换流器等效回路电压方程为

$$\begin{cases} L \frac{di_{gd}}{dt} = -Ri_{gd} + \omega Li_{gq} + e_d - u_{gd} \\ L \frac{di_{gq}}{dt} = -Ri_{gq} + \omega Li_{gd} + e_q - u_{gq} \end{cases} \quad (10)$$

式中: $i_{gd}$ 、 $i_{gq}$ 分别为换流器流入电网侧的 $d$ 轴电流分量和 $q$ 轴电流分量; $R$ 为换流器损耗和滤波电感组合的等效电阻; $L$ 为电网侧滤波电感; $e_d$ 、 $e_q$ 分别为电网电压的 $d$ 轴分量和 $q$ 轴分量; $u_{gd}$ 、 $u_{gq}$ 分别为换流器输出电压的 $d$ 轴分量和 $q$ 轴分量。

由式(10)可知,轴与轴之间存在耦合项。因此,采用一种解耦控制器来控制网侧换流器,通过引入解耦项来实现对轴的独立控制,如图5所示。

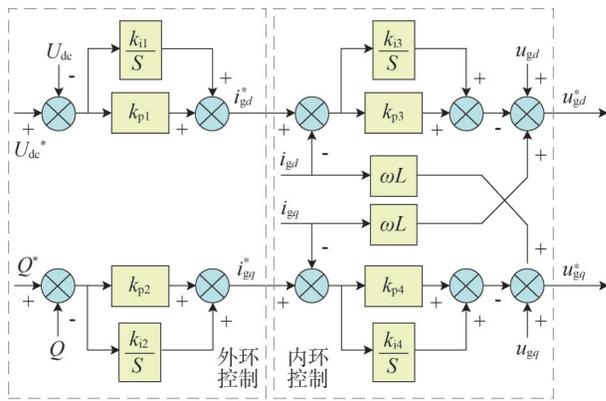


图5 网侧控制

Fig.5 Grid side control

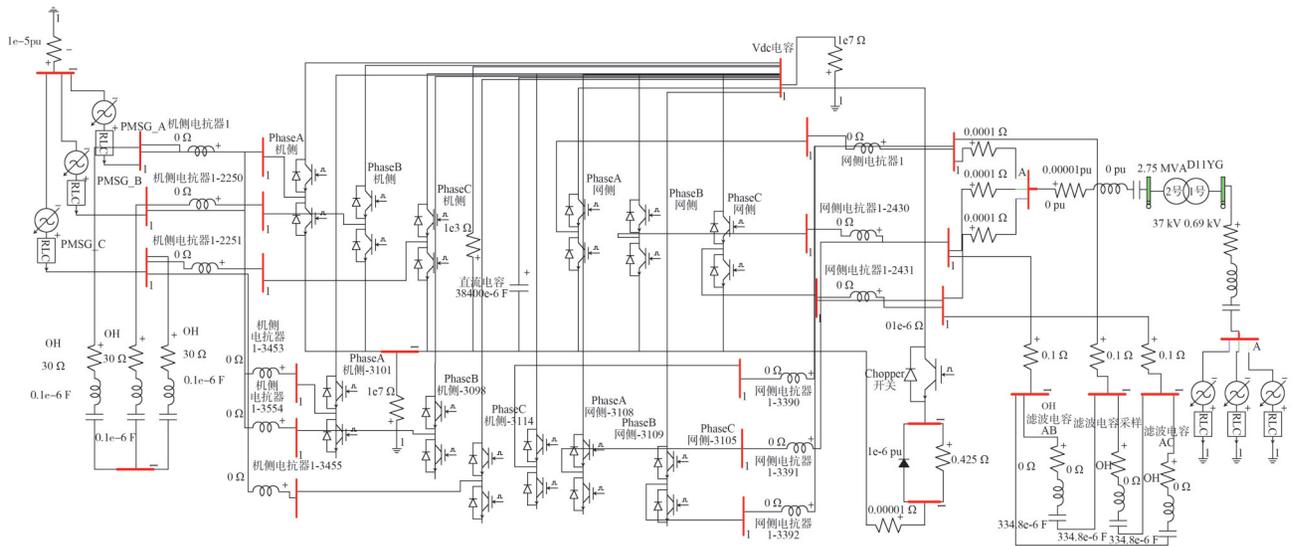


图6 直驱风机半实物仿真电磁模型

Fig.6 Semi-physical simulation electromagnetic model of direct drive fan

### 3 电磁模型

#### 3.1 半实物仿真电磁模型

基于ADPSS平台搭建直驱风机半实物电磁仿真模型,直驱风机额定容量2.6 MW,拓扑结构设置为双功率单元,直驱永磁电机设置为单电机,换流器电平数为2,详细拓扑如图6所示。

由图6可知网侧换流器出口后通过箱式变压器并网,并网电压为37 kV,箱式变压器详细参数见表1。直驱永磁风力发电机的主要参数见表2。换流器主电路的机侧和网侧参数见表3和表4。网侧滤波器采用三角形连接方式,减小电容对系统的谐振影响,加强滤波效果;机侧滤波器采用星形连接方式,减小电容电流差,平衡直流功率。

表1 箱式变压器参数

Table 1 Box transformer parameters

变比	额定容量/MVA	短路损耗/kW	短路电压百分比/%	空载损耗/kW	空载电流百分比/%
37/0.69	2.75	23.2	6.5	2.36	0.6

#### 3.2 电磁模型验证

设置电机模型满发时的电磁转矩为1400000 N·m,模型启动后经过0.45 s趋于稳定,稳定追踪电磁转矩设定值,结果如图7所示。有功功率如图8所示。

表2 直驱永磁风力发电机参数

Table 2 Direct drive permanent magnet wind turbine parameters

额定功率 $S_n$ /MVA	额定线电压 $U_n$ /kV	$d$ 轴电感 $L_d/\Omega$	$q$ 轴电感 $L_q/\Omega$	极对数 $n_p$	永磁体磁链 $\psi_f$	额定转速 $\omega_N$ (rad/min)
2.5	0.69	0.049 775 7	0.049 775 7	39	1	13

表3 主电路机侧参数

Table 3 Main circuit machine side parameters

机侧电压/kV	滤波电感 $L_m$ /mH	滤波电容 $C_m/\mu F$	滤波电阻 $R_m/\Omega$	直流稳压电容 $C_{dc}/\mu F$	Chopper 电阻 $R_{Chop}/\Omega$
0.69	4.6	0.1	30	38 400	0.425

表4 主电路网侧参数

Table 4 Main circuit network side parameters

电网电压/kV	滤波电感 $L_g$ /mH	滤波电容 $C_g/\mu F$	滤波电阻 $R_g/\Omega$	网侧等效电感 $L_{geq}$ /mH	网侧等效电阻 $R_{geq}/\Omega$
37	0.15	334.8	0.1	590	18.558

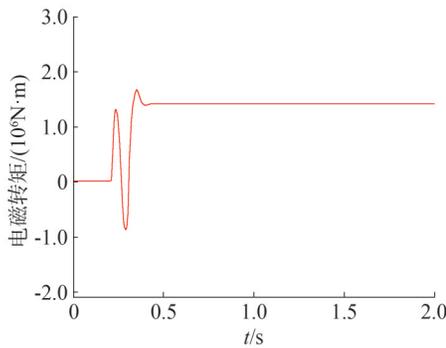


图7 电磁转矩

Fig.7 Electromagnetic torque

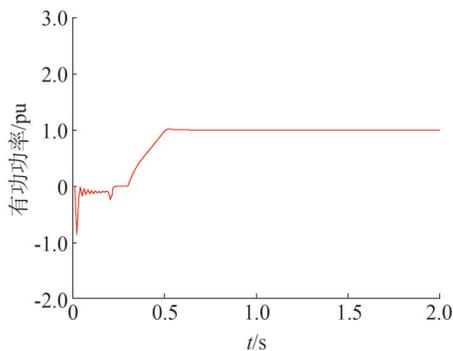


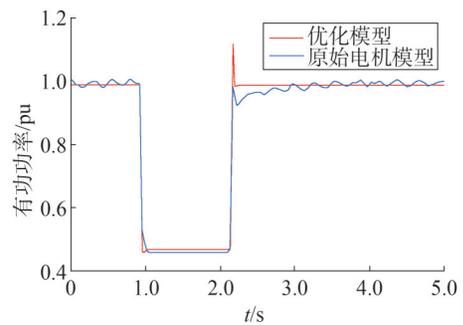
图8 有功功率

Fig.8 Active power

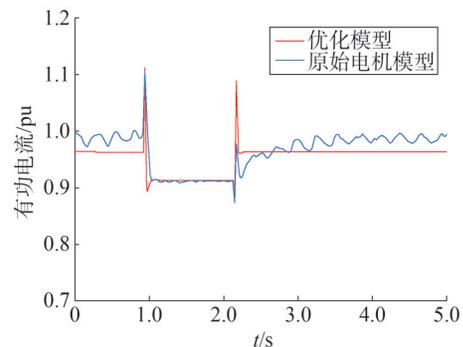
得电压源输出电压频率  $f_g = 8.45$  Hz, 则

$$\omega_N = \frac{60f_g}{n_p} \quad (11)$$

通过改进,发现在 35% 低电压穿越期间,电机模型的有功功率和有功电流都得到了显著的改善,如图 9 所示。由图 9 可知,这种改进使得有功波动大大降低,并且提高了半实物仿真的精度。



(a)有功功率



(b)有功电流

图9 有功波形对比

Fig.9 Active waveform comparison

## 4 实例应用

### 4.1 电机优化

利用 ADPSS 半实物仿真平台对某风电场的直驱风机控制器进行半实物仿真测试。部分工况存在有功功率波动问题,针对直驱电机模型进行优化,采用电压源直接频率控制,通过式(11)和表 2 数据可

#### 4.2 某直驱风机半实物仿真

采用改进的电机模型,设置电压源为电压直接压降模式,为研究直驱风机在交流强网中的特性,设置电网短路比(short circuit ratio,SCR)为10(标志着此处电网短路容量较大,可在低穿期间有效支撑风机),参照国标要求完成高低穿仿真测试,20%额定电压低穿工况和130%额定电压高穿工况数据如图10所示。

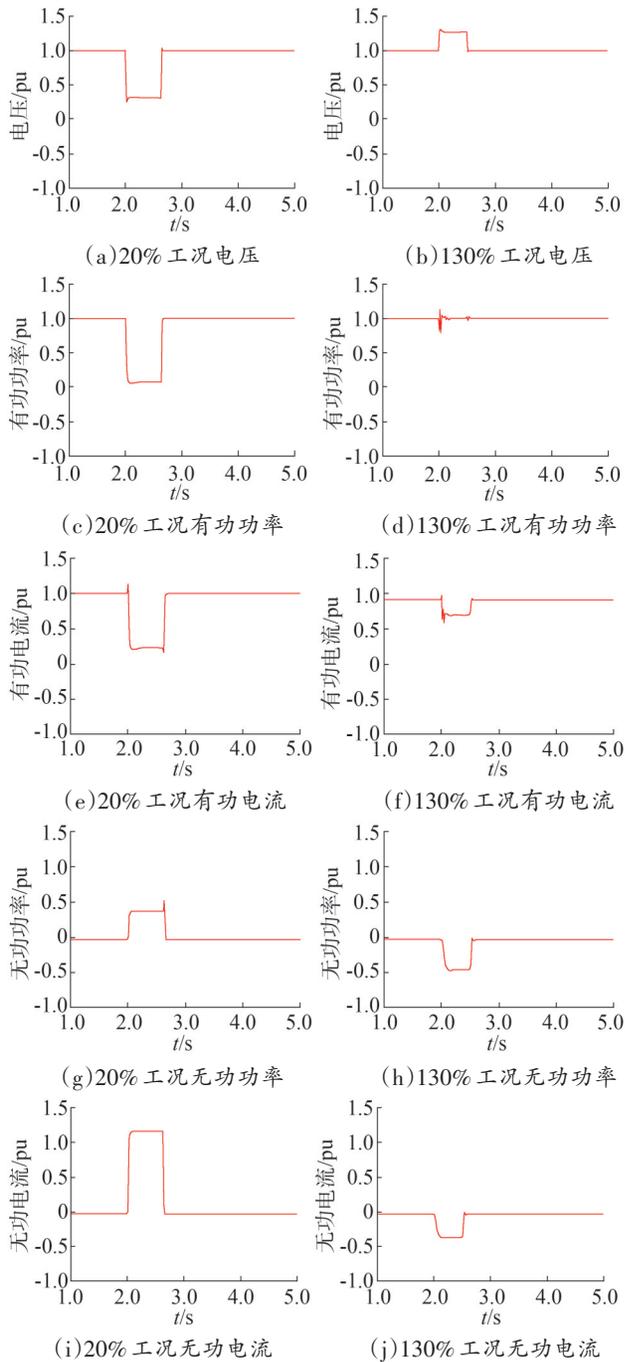


图10 直驱风机半实物数据

Fig.10 Direct drive fan semi-physical data

通过图10可知:搭建的半实物仿真电磁模型在完成硬件匹配后也成功实现了服务器仿真数据和直驱风机控制器硬件之间的信息交互。整套直驱风机半实物系统的软硬件配合无误、通信正常,成功实现了低电压穿越和高电压穿越。

#### 5 结束语

获得精准的新能源设备电磁模型,对准确模拟新能源场站的电网动态响应、提升新型电力系统稳定性,具有重要意义。利用半实物数据校对电磁模型精准性,是解决新能源设备模型的精度问题的有效方法。搭建了详细的直驱风机半实物电磁模型,针对有功波动情况,采用直接频率控制方法,优化电机模型,依托ADPSS平台完成了半实物仿真,为模型校对提供了精准半实物数据,保证了电网安全稳定运行。

#### 参考文献

[1] 王玥娇,张兴友,郭俊山.储能技术在高比例可再生能源电力系统中的应用[J].山东电力技术,2021,48(7):19-25.  
WANG Yuejiao, ZHANG Xingyou, GUO Junshan. Review on the application of energy storage technology in power system with high proportion of renewable energy[J].Shandong Electric Power, 2021, 48(7):19-25.

[2] 李凯,康世崑,闫方,等.基于风光火储的多能互补新能源基地规划分析[J].山东电力技术,2020,47(10):17-21.  
LI Kai, KANG Shiwei, YAN Fang, et al. Planning analysis of new energy base based on wind-photovoltaic-thermal-energy storage multi-energy complementary [J].Shandong Electric Power, 2020, 47(10):17-21.

[3] 肖云鹏,王锡凡,王秀丽,等.面向高比例可再生能源的电力市场研究综述[J].中国电机工程学报,2018,38(3):663-674.  
XIAO Yunpeng, WANG Xifan, WANG Xiuli, et al. Review on electricity market towards high proportion of renewable energy [J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(3):663-674.

[4] 关立,黄国栋,吴锋,等.面向高比例分布式光伏的电力调度及市场化机制研究[J].浙江电力,2022,41(8):10-16.  
GUAN Li, HUANG Guodong, WU Feng, et al. Research on power dispatching and marketization mechanism for high-proportion distributed photovoltaic [J]. Zhejiang Electric Power, 2022, 41(8):10-16.

[5] 舒印彪,张智刚,郭剑波,等.新能源消纳关键因素分析及解决措施研究[J].中国电机工程学报,2017,37(1):1-9.  
SHU Yinbiao, ZHANG Zhigang, GUO Jianbo, et al. Study on key factors and solution of renewable energy accommodation [J].

- Proceedings of the CSEE, 2017, 37(1): 1-9.
- [6] 唐西胜, 苗福丰, 齐智平, 等. 风力发电的调频技术研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(25): 4304-4314.  
TANG Xisheng, MIAO Fufeng, QI Zhiping, et al. Survey on frequency control of wind power [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(25): 4304-4314.
- [7] 薛禹胜, 雷兴, 薛峰, 等. 关于风电不确定性对电力系统影响的评述[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(29): 5029-5040.  
XUE Yusheng, LEI Xing, XUE Feng, et al. A review on impacts of wind power uncertainties on power systems [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(29): 5029-5040.
- [8] Wind in Europe. Wind in power: 2016 European statistics [R]. WindEurope, 2017.
- [9] 潘丽, 杜尔顺, 王剑晓, 等. 风力发电与光热发电联合运行经济效益研究[J]. 综合智慧能源, 2022, 44(1): 26-30.  
PAN Li, DU Ershun, WANG Jianxiao, et al. Research on economic benefits of joint operation of wind farms and concentrating solar power plants [J]. Integrated Intelligent Energy, 2022, 44(1): 26-30.
- [10] 吴斌, 郎永强, Navid Zargari, 等. 风力发电系统的功率变换与控制[M]. 北京: 机械工业出版社, 2012.
- [11] 王锡凡, 肖云鹏, 王秀丽. 新形势下电力系统供需互动问题研究及分析[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(29): 5018-5028.  
WANG Xifan, XIAO Yunpeng, WANG Xiuli. Study and analysis on supply-demand interaction of power systems under new circumstances [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(29): 5018-5028.
- [12] 吴爱华, 赵不贻, 茅靖峰, 等. 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.  
WU Aihua, ZHAO Buhui, MAO Jingfeng, et al. Wind power generation hardware-in-loop simulation system based on rapid control prototype technology [J]. Journal of System Simulation, 2020, 32(3): 482-491.
- [13] 张晓琳, 吴宗光, 王卫星, 等. 大功率并网逆变器半实物仿真平台研究[J]. 电力电子技术, 2018, 52(9): 104-106.  
ZHANG Xiaolin, WU Zongguang, WANG Weixing, et al. Design and implementation of the semi-physical simulation for high-power grid-connected inverter [J]. Power Electronics, 2018, 52(9): 104-106.
- [14] 曹政, 张永明. 风力电机控制器半实物仿真测试平台[J]. 计量与测试技术, 2019, 46(2): 6-9. CAO Zheng, ZHANG Yongming. Hil simulation test platform for wind power controller [J]. Metrology & Measurement Technique, 2019, 46(2): 6-9.
- [15] 田鹏飞, 刘崇茹, 洪国巍, 等. 模块化多电平换流器半实物仿真平台设计与实验验证[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(1): 122-128.  
TIAN Pengfei, LIU Chongru, HONG Guowei, et al. Design and experimental verification of a hardware-in-the-loop simulation platform for modularized multilevel converter [J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(1): 122-128.
- [16] 刘安成. 基于RT-LAB的光伏并网发电系统半实物仿真研究[D]. 青岛: 青岛科技大学, 2022.
- [17] 王冰. 风力发电机组及海上风电机组控制技术[M]. 南京: 南京大学出版社, 2021.
- [18] 萨迪·瓦兹-扎德. 永磁同步电机的建模与控制[M]. 北京: 机械工业出版社, 2022.
- [19] 徐殿国, 王伟, 陈宁. 基于撬棒保护的双馈电机风电场低电压穿越动态特性分析[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(22): 29-36.  
XU Dianguo, WANG Wei, CHEN Ning. Dynamic characteristic analysis of doubly-fed induction generator low voltage ride-through based on crowbar protection [J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(22): 29-36.
- [20] 林瑞星, 马晓阳, 常晓青, 等. 电网电压不对称暂降下考虑Chopper动作的双馈风机转子电流分析[J]. 电力系统及其自动化学报, 2019, 31(4): 106-112.  
LIN Ruixing, MA Xiaoyang, CHANG Xiaoqing, et al. Analysis of DFIG rotor current considering chopper protection under asymmetrical grid voltage sags [J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2019, 31(4): 106-112.

收稿日期: 2023-03-20

修回日期: 2023-11-14

作者简介:

张志轩(1995), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为电力系统仿真分析和新能源半实物仿真研究;

李乐蒙(1991), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为输变电工程前期及建设管理和风电场接入研究;

周宁(1992), 女, 硕士, 工程师, 研究方向为电力系统仿真分析和新能源半实物仿真研究;

贾小凡(1995), 女, 硕士, 工程师, 研究方向为电力系统仿真分析;

蒋哲(1985), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向为电力系统仿真分析;

赵康(1990), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为电力系统仿真分析和新能源半实物仿真研究。

(责任编辑 郑天茹)