

DOI: 10.11918/202412038

# 计其源端特性的构网型直驱风机稳定性分析

刘尊祝<sup>1</sup>, 程志江<sup>2</sup>, 杨涵棣<sup>1</sup>

(1. 可再生能源发电与并网技术教育部工程研究中心(新疆大学), 乌鲁木齐 830017;  
2. 新疆大学 智能科学与技术学院, 乌鲁木齐 830017)

**摘要:** 为准确描述构网型直驱风机的动态特性, 并分析其不同电网强度下的稳定性, 考虑风机源端特性对系统进行小信号建模。首先, 基于状态空间建模方法, 详细构建了基于虚拟同步机控制的构网型直驱风机全系统小信号模型, 并通过仿真测试验证了所建小信号模型的准确性。其次, 通过特征模态分析, 研究了不同电网强度对系统稳定性的影响, 评估其在弱电网环境下的适应性。同时, 分析风速阶跃扰动对系统低频振荡的诱发机制, 探讨系统结构参数(如直流侧电容)及控制器参数对系统动态性能的影响。最后, 基于 RT-LAB 半实物仿真平台搭建系统模型, 验证了模型在实时仿真环境下的响应能力和准确性。结果表明, 构网型直驱风机在弱电网条件下具有较强的适应性, 但在风速阶跃扰动下易诱发低频振荡。此外, 合理调整系统结构参数和优化控制器参数可有效抑制低频振荡, 提高系统在弱电网环境下的稳定性。本研究为构网型风电机组的动态特性分析提供了一种系统性的建模方法, 并为进一步优化其稳定控制策略提供了理论支持。

**关键词:** 虚拟同步机; 构网型直驱风机; 小信号模型; 特征模态分析; 弱电网适应性; 低频振荡; RT-LAB 半实物仿真

中图分类号: TM614

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2026)04-0128-13

## Stability analysis of grid-forming direct-drive wind turbine considering source characteristics

LIU Zunzhu<sup>1</sup>, CHENG Zhijiang<sup>2</sup>, YANG Handi<sup>1</sup>

(1. Engineering Research Center of Renewable Energy Power Generation and Grid-Connected Technology, Ministry of Education (Xinjiang University), Urumqi 830017, China;  
2. School of Intelligence Science and Technology, Xinjiang University, Urumqi 830017, China)

**Abstract:** To accurately describe the dynamic characteristics of grid-forming direct-drive wind turbines and analyze their stability under different grid strengths, this study considers the source-side characteristics of wind turbines and conducts small-signal modeling of the system. First, based on the state-space modeling method, a comprehensive small-signal model of the entire grid-forming direct-drive wind turbine system with virtual synchronous generator (VSG) control is constructed, and its accuracy is verified through simulation tests. Second, eigenvalue-based modal analysis is employed to investigate the impact of different grid strengths on system stability and assess its adaptability in weak grid environments. Additionally, the mechanism of low-frequency oscillations induced by wind speed step disturbances is analyzed, along with the effects of system structural parameters (such as DC-side capacitance) and controller parameters on the system's dynamic performance. Finally, an RT-LAB hardware-in-the-loop simulation platform is used to build the system model, validating its response capability and accuracy in real-time simulation environments. The results indicate that grid-forming direct-drive wind turbines exhibit strong adaptability in weak grid conditions but may prompt low-frequency oscillations under wind speed step disturbances. Moreover, properly adjusting system structural parameters and optimizing controller parameters can effectively suppress low-frequency oscillations and enhance system stability in weak grid environments. This study provides a systematic modeling approach for analyzing the dynamic characteristics of grid-forming wind turbines and offers theoretical support for further optimizing their stability control strategies.

**Keywords:** virtual synchronous generator; grid-forming direct-drive wind turbine; small-signal model; eigenvalue modal analysis; adaptability to weak grids; low-frequency oscillation; RT-LAB hardware-in-the-loop simulation

收稿日期: 2024-12-12; 录用日期: 2025-03-05; 网络首发日期: 2025-11-21

网络首发地址: <https://link.cnki.net/urlid/23.1235.T.20251121.1130.004>

基金项目: 新疆维吾尔自治区科技计划项目-重大科技专项(2022A01004-1)

作者简介: 刘尊祝(1999—), 男, 硕士研究生; 程志江(1977—), 男, 教授, 博士生导师

通信作者: 程志江, [chenzhijiang@xju.edu.cn](mailto:chenzhijiang@xju.edu.cn)

随着电网结构由以同步发电机为主向新能源发电和电力电子设备为核心转变, 电网逐渐呈现出高新能源渗透率和高电力电子设备比例的“双高”特性<sup>[1-3]</sup>。这一转型对系统的稳定性提出了更高要求。构网型控制技术, 特别是虚拟同步机 (virtual synchronous generator, VSG) 控制, 以其显著的功率同步和惯性同步特性, 为满足现代电力系统中新能源并网的需求提供了重要支持<sup>[4-8]</sup>。然而, 传统的构网型模型通常将直流侧简化为理想电压源, 难以全面表征风电、光伏等动态复杂的分布式电源特性。

作为主流新能源机组, 直驱风机 (direct-drive wind turbine, DDWT) 在采用虚拟同步控制实现并网后, 其稳定性问题成为关键研究课题之一<sup>[9-10]</sup>。针对构网型逆变器并网系统, 文献[11-15]通过小信号建模和特征模态分析揭示了 VSG 控制的频率调节特性, 并分析了参数变化对稳定性的影响。文献[16]进一步研究了 VSG 多机并网的低频振荡特性。然而, 这些研究多假设源端为理想直流电压源, 忽略了新能源源端动态特性对系统稳定性的影响。

针对构网型 DDWT 的研究较少, 文献[17]通过频域分析建立了构网型 DDWT 的输出阻抗模型, 验证了模型的正确性, 但未从时域角度深入探讨源端扰动的动态影响。文献[18-19]将 VSG 技术引入 DDWT 系统, 构建了小信号模型, 并分析了不同参数对系统稳定性的影响, 但未涉及风速扰动时参数动态变化对直流母线电压波动的影响。文献[20]研究了 VSG 直驱风电机组并联运行时的低频特征模态稳定性, 但未充分考虑源端动态特性对系统耦合振荡的作用。

综上所述, 当新能源设备作为动态复杂的源端与电网耦合时, 其运行状态对系统动态稳定性具有显著影响。因此, 亟须构建考虑源端特性的构网型 DDWT 并网系统小信号模型, 以揭示关键参数对系统稳定性的影响, 并为系统优化设计提供理论支持。

### 1 构网型 DDWT 的数学模型

基于 VSG 的构网型直驱风机的结构如图 1 所示, 主要由风机、永磁同步发电机、全功率变换器, 以及控制系统构成。

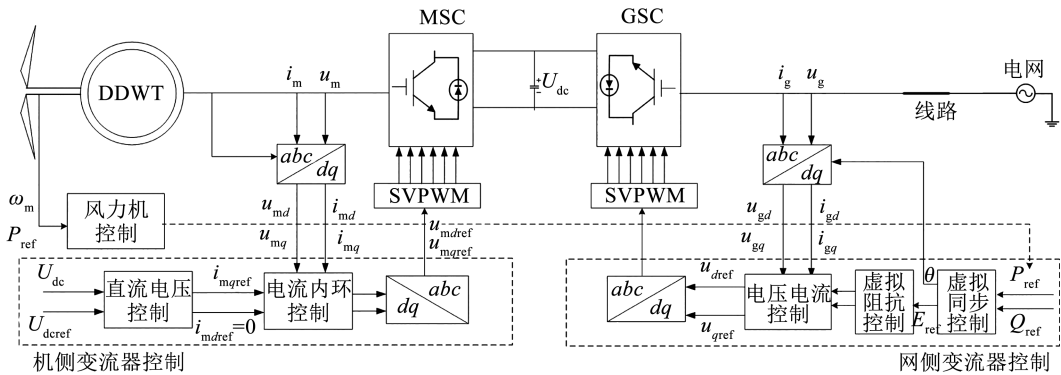


图 1 构网型直驱风机结构框图

Fig. 1 Schematic diagram of the grid-forming direct-drive wind turbine structure

#### 1.1 DDWT 的数学模型

电流和电压在 DDWT 内部的相互作用通过引入交流源和串联阻抗来描述, 对应的数学表达式如下:

$$\begin{cases} l_{md} \frac{di_{md}}{dt} = u_{md} - r_s i_{md} + P\omega_m i_{mq} l_{mq} \\ l_{mq} \frac{di_{mq}}{dt} = u_{mq} - r_s i_{mq} - P\omega_m i_{md} l_{md} - P\omega_m \Phi_f \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $\omega_m$  为机械角速度,  $u_{md}$ 、 $u_{mq}$  分别为定子电压的  $d$ 、 $q$  轴分量,  $i_{md}$ 、 $i_{mq}$  分别为定子电流的  $d$ 、 $q$  轴分量,  $l_{md}$ 、 $l_{mq}$  分别为定子电感的  $d$ 、 $q$  轴分量,  $r_s$  为定子电阻,  $\Phi_f$  为转子磁通,  $P$  为极对数。

DDWT 转子运动方程为

$$J_w \frac{d\omega_m}{dt} = \frac{0.5\rho\pi R^2 C_p v^3}{\omega_m} - 1.5P\Phi_f i_{mq} \quad (2)$$

式中:  $J_w$  为风机自身转动惯量,  $\rho$  为空气密度,  $R$  为风机叶片半径,  $C_p$  为风能利用系数,  $v$  为风速。

#### 1.2 机侧变流器控制的数学模型

构网型 DDWT 机侧变流器控制目标为维持直流电压稳定, 控制框图见图 2。

引入中间变量  $z_1$ 、 $z_2$ 、 $z_3$  后, 得到机侧变流器控制方程如下:

$$\begin{cases} \frac{dz_1}{dt} = U_{dcref} - U_{dc} \\ \frac{dz_2}{dt} = i_{mqref} - i_{mq} \\ \frac{dz_3}{dt} = i_{mdref} - i_{md} \\ i_{mqref} = K_{p1} (U_{dcref} - U_{dc}) + K_{i1} z_1 \\ u_{mqref} = K_{p2} (i_{mqref} - i_{mq}) + K_{i2} z_2 + P\omega_m l_{md} i_{md} + P\omega_m \Phi_f \\ u_{mdref} = K_{p3} (i_{mdref} - i_{md}) + K_{i3} z_3 - P\omega_m l_{mq} i_{mq} \end{cases} \quad (3)$$

式中： $U_{dref}$  为直流侧电压参考值， $U_{dc}$  为直流侧电压值， $i_{mdqref}$  为输入至内环的电流参考值的  $d$ 、 $q$  轴分量， $u_{mdqref}$  为机侧换流器直流侧电压参考值的  $d$ 、 $q$  轴分量， $K_{p1}$ 、 $K_{i1}$  为直流电压外环控制参数， $K_{p2}$ 、 $K_{i2}$ 、 $K_{p3}$ 、 $K_{i3}$  为机侧电流内环控制参数。

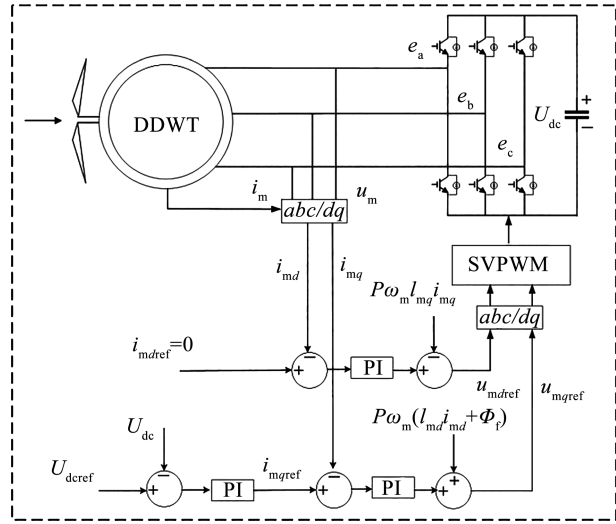


图 2 机侧变流器控制框图

Fig. 2 Block diagram of Machine-side converter control

### 1.3 直流侧电容的数学模型

在风力发电系统中，直流侧电容器不仅连接发电机侧和电网侧，还起到平稳系统功率波动的作用，其模型可以表示为

$$C_{dc} U_{dc} \frac{dU_{dc}}{dt} = p_m - p_g = (u_{md} i_{md} + u_{mq} i_{mq}) - (u_{gd} i_{gd} + u_{gq} i_{gq}) \quad (4)$$

式中： $C_{dc}$  为直流侧电容值， $p_m$  为定子侧发出的有功功率， $p_g$  为网侧输入的有功功率， $i_{gdq}$  为滤波后网侧电流的  $d$ 、 $q$  轴分量， $u_{gdq}$  为滤波后网侧电压的  $d$ 、 $q$  轴分量。

### 1.4 网侧变流器控制的数学模型

采集滤波器输出电压与电流经瞬时功率计算可以得到 VSG 输出功率如下：

$$\begin{cases} P = 1.5(u_{gd} i_{gd} + u_{gq} i_{gq}) \\ Q = 1.5(u_{gq} i_{gd} - u_{gd} i_{gq}) \end{cases} \quad (5)$$

控制框图如图 3 所示，根据 VSG 控制的功频和励磁控制器的框图可得 VSG 控制算法如下：

$$\begin{cases} J \frac{d(\omega_g - \omega_0)}{dt} = \frac{P_{ref} + K_p(\omega_0 - \omega_g) - P_e}{\omega_0} - D_p(\omega_g - \omega_0) \\ \frac{d\theta}{dt} = \omega_g \\ U_{ref} = U_N + D_q(Q_{ref} - Q) \\ \frac{de}{dt} = U_{ref} - U_m \end{cases} \quad (6)$$

式中： $\omega_0$  为电网额定频率， $\omega_g$  为网侧同步角频率，

$\theta$  为网侧虚拟同步角度， $P_e$  为网侧输出有功功率， $P_{ref}$  为风机输出的功率指令参考值， $K_p$  为有功调频系数， $J$  为虚拟惯量系数， $D_p$  为虚拟阻尼系数， $Q$  为网侧输出无功功率， $Q_{ref}$  为网侧无功参考值， $U_{ref}$  为机端电压幅值参考值， $U_N$  为空载电压， $D_q$  为无功电压下垂系数， $U_m$  为网侧输出电压幅值， $e$  为电压的偏差量。

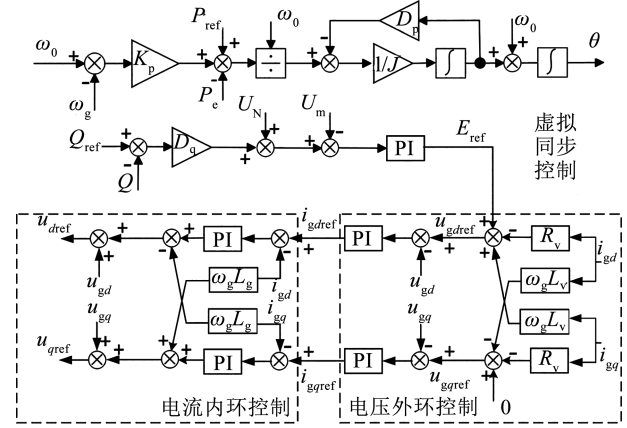


图 3 网侧变流器控制框图

Fig. 3 Block diagram of grid-side converter control

引入中间变量  $z_4$ 、 $z_5$ 、 $z_6$ 、 $z_7$  后，得到网侧变流器控制方程如下：

$$\begin{cases} \frac{dz_4}{dt} = u_{gdref} - u_{gd} \\ \frac{dz_5}{dt} = i_{gdref} - i_{od} \\ \frac{dz_6}{dt} = i_{gqref} - i_{oq} \\ \frac{dz_7}{dt} = u_{gqref} - u_{gq} \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} u_{gdref} &= E_{ref} + \omega_g L_v i_{gq} - R_v i_{gd} \\ u_{gqref} &= -\omega_g L_v i_{gd} - R_v i_{gq} \\ i_{gdref} &= K_{p4}(u_{gdref} - u_{gd}) + K_{i4} z_4 \\ i_{gqref} &= K_{p7}(u_{gqref} - u_{gq}) + K_{i7} z_7 \\ u_{dref} &= K_{p5}(i_{gdref} - i_{od}) + K_{i5} z_5 - \omega_g L_f i_{oq} + u_{gd} \\ u_{qref} &= K_{p6}(i_{gqref} - i_{oq}) + K_{i6} z_6 + \omega_g L_f i_{od} + u_{gq} \end{aligned}$$

式中： $u_{gdqref}$  为输入至电压外环的电压参考值的  $d$ 、 $q$  轴分量， $i_{gdqref}$  为输入至电流内环的电流参考值的  $d$ 、 $q$  轴分量， $u_{dref}$  为网侧换流器输出电压参考值的  $d$ 、 $q$  轴分量， $K_{p4}$ 、 $K_{i4}$ 、 $K_{p7}$ 、 $K_{i7}$  为网侧电压外环控制参数， $K_{p5}$ 、 $K_{i5}$ 、 $K_{p6}$ 、 $K_{i6}$  为网侧电流内环控制参数， $L_f$  为滤波电感值。在电压外环控制中引入虚拟阻抗，其中  $R_v$ 、 $L_v$  分别为虚拟电阻与虚拟电感。

### 1.5 滤波器与线路的数学模型

假设逆变器输出电压能够准确跟踪给定值，忽略电力电子器件开关延迟和损耗，结合基本的电路定律可得滤波器的数学表达式如下：

$$\begin{cases} \frac{di_{od}}{dt} = \frac{1}{L_f}(\omega_g L_f i_{oq} + u_{od} - u_{gd}) \\ \frac{di_{oq}}{dt} = \frac{1}{L_f}(-\omega_g L_f i_{od} + u_{oq} - u_{gq}) \\ \frac{du_{gd}}{dt} = \frac{1}{C_f}(\omega_g C_f u_{gq} + i_{od} - i_{gd}) \\ \frac{du_{gq}}{dt} = \frac{1}{C_f}(-\omega_g C_f u_{gd} + i_{oq} - i_{gq}) \\ \frac{di_{gd}}{dt} = \frac{1}{L_g}(-R_f i_{gd} + \omega_g L_g i_{gq} + u_{gd} - u_{pd}) \\ \frac{di_{gq}}{dt} = \frac{1}{L_g}(-R_f i_{gq} - \omega_g L_g i_{gd} + u_{gq} - u_{pq}) \end{cases} \quad (8)$$

其中,电网电压  $u_p$  的  $d$ 、 $q$  轴分量可表示为:

$$\begin{aligned} u_{pd} &= U_m \cos \theta \\ u_{pq} &= -U_m \sin \theta \end{aligned}$$

式中: $i_{odq}$  为逆变器输出电流的  $d$ 、 $q$  轴分量, $u_{odq}$  为逆变器输出电压的  $d$ 、 $q$  轴分量, $u_{pdq}$  为汇流母线处电压的  $d$ 、 $q$  轴分量, $R_f$  为线路电阻, $L_g$  为线路电感, $C_f$  为

滤波电容。

## 2 系统小信号建模与稳定性分析

联立构网型 DDWT 各模块的数学模型,对系统进行小信号建模,可得风电机组系统小信号模型为

$$\Delta \dot{\mathbf{x}}_F = \mathbf{A}_F \Delta \mathbf{x}_F + \mathbf{B}_F \Delta \mathbf{u} \quad (9)$$

其中:

$$\begin{aligned} \Delta \mathbf{x}_F &= [\Delta x_{F1} \quad \Delta x_{F2} \quad \Delta x_{F3}]^T \\ \Delta \mathbf{x}_{F1} &= [\Delta z_1 \quad \Delta z_2 \quad \Delta z_3 \quad \Delta \omega_m \quad \Delta U_{dc} \quad \Delta i_{md} \quad \Delta i_{mq}]^T \\ \Delta \mathbf{x}_{F2} &= [\Delta z_4 \quad \Delta z_5 \quad \Delta z_6 \quad \Delta z_7 \quad \Delta \omega_g \quad \Delta \theta]^T \\ \Delta \mathbf{x}_{F3} &= [\Delta i_{od} \quad \Delta i_{oq} \quad \Delta u_{gd} \quad \Delta u_{gq} \quad \Delta i_{gd} \quad \Delta i_{gq} \quad \Delta e]^T \\ \Delta \mathbf{u} &= [\Delta u_{pd} \quad \Delta u_{pq}]^T \end{aligned}$$

风电机组的系数矩阵为

$$\mathbf{A}_F = \begin{bmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{B} \\ \mathbf{C} & \mathbf{D} \end{bmatrix} \quad (10)$$

其中,  $\mathbf{A} \mathbf{B} \mathbf{C} \mathbf{D}$  的表达式如下:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ K_{i1} & 0 & 0 & 0 & -K_{p1} & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{0.5\rho\pi R^2 C_p v^3}{J_w \omega_m^2} & 0 & 0 & \frac{1.5P\Phi_f}{J_w} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{u_{md0}}{c_{dc} u_{dc}} & \frac{u_{mq0}}{c_{dc} u_{dc}} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{K_{i3}}{l_{md}} & 0 & 0 & -\frac{r_s + K_{p3}}{l_{md}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{K_{i1} K_{p2}}{l_{mq}} & \frac{K_{i2}}{l_{mq}} & 0 & 0 & \frac{K_{p1} K_{p2}}{l_{mq}} & 0 & -\frac{(r_s + K_{p2})}{l_{mq}} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & K_{i4} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{I_{gd0}}{c_{dc} U_{dc0}} & -\frac{I_{gq0}}{c_{dc} U_{dc0}} & -\frac{U_{gd0}}{c_{dc} U_{dc0}} & -\frac{U_{gq0}}{c_{dc} U_{dc0}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & L_v i_{gq0} & 0 & 0 & K_{p8} D_q I_{gq0} - 1 & -K_{p8} D_q I_{gd0} & -K_{p8} D_q U_{gq0} - R_v & K_{p8} D_q U_{gd0} + \omega_{g0} L_v & K_{i8} & 0 & 0 \\ 0 & L_v K_{p4} i_{gq0} & -1 & 0 & K_{p4} (K_{p8} D_q I_{gq0} - 1) & -K_{p4} K_{p8} D_q I_{gd0} & -K_{p4} (K_{p8} D_q U_{gq0} + R_v) & K_{p4} (K_{p8} D_q U_{gd0} + \omega_{g0} L_v) & K_{p4} K_{i8} & 0 & 0 \\ K_{i7} & -L_v K_{p7} i_{gd0} & 0 & -1 & 0 & -K_{p7} & -K_{p7} \omega_{g0} L_v & -K_{p7} R_v & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$C = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2}\rho\pi R^3\omega_m^2 C_p \\ & & & \lambda^3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{K_{p5}K_{i4}}{L_f} & \frac{K_{i5}}{L_f} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{K_{i6}}{L_f} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$D = \begin{bmatrix} 0 & -L_v i_{gd0} & 0 & 0 & 0 & -1 & -\omega_{g0} L_v & -R_v & 0 & 0 \\ 0 & \frac{K_p + D_p \omega_0}{J\omega_0} & 0 & 0 & -\frac{I_{gd0}}{J\omega_0} & \frac{I_{gg0}}{J\omega_0} & -\frac{U_{gd0}}{J\omega_0} & -\frac{U_{gg0}}{J\omega_0} & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{K_{p4}K_{p5}i_{gd0}L_v}{L_f} & -\frac{K_{p5}}{L_f} & 0 & \frac{K_{p5}K_{p4}(-1+D_q K_{p8}I_{gd0})}{L_f} & -\frac{K_{p5}K_{p4}D_q K_{p8}I_{gd0}}{L_f} & -\frac{K_{p4}K_{p5}(R_v + D_q K_{p8}U_{gg0})}{L_f} & \frac{K_{p4}K_{p5}(L_v\omega_{g0} + D_q K_{p8}U_{gd0})}{L_f} & \frac{K_{i8}K_{p4}K_{p5}}{L_f} & 0 \\ \frac{K_{p6}K_{i7}}{L_f} & -\frac{K_{p6}K_{p7}i_{gd0}L_v}{L_f} & 0 & -\frac{K_{p6}}{L_f} & 0 & -\frac{K_{p6}K_{p7}}{L_f} & -\frac{K_{p6}K_{p7}\omega_{g0}L_v}{L_f} & -\frac{K_{p6}K_{p7}R_v}{L_f} & 0 & 0 \\ 0 & u_{gd0} & \frac{1}{C_f} & 0 & 0 & \omega_{g0} & -\frac{1}{C_f} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -u_{gd0} & 0 & \frac{1}{C_f} & -\omega_{g0} & 0 & 0 & -\frac{1}{C_f} & 0 & 0 \\ 0 & i_{gd0} & 0 & 0 & \frac{1}{L_g} & 0 & \frac{-R_g}{L_g} & \omega_{g0} & 0 & \frac{U_m \sin \delta_0}{L_g} \\ 0 & -i_{gd0} & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{L_g} & -\omega_{g0} & \frac{-R_g}{L_g} & 0 & \frac{U_m \cos \delta_0}{L_g} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & D_q I_{gd0} & -D_q I_{gd0} & -D_q U_{gd0} & D_q U_{gd0} & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

输入端的系数矩阵可表示为  $B_F$ , 其表达式为

$$B_F = \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{17 \times 1} & \mathbf{0}_{17 \times 1} \\ -\frac{1}{L_g} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{L_g} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (11)$$

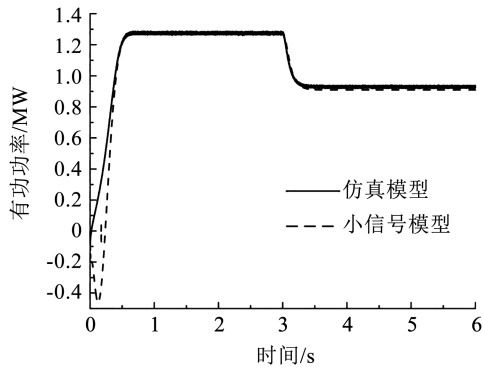
### 2.1 小信号模型准确性验证

针对本文建立的直驱风机状态空间小信号模型验证其精确有效性, 本文在 MATLAB/Simulink 软件中搭建了构网型直驱风机并网系统仿真模型。同时依据式(9)建立了对应的线性小信号模型, 设初始风速为 10 m/s, 对两种模型施加相同的风速扰动

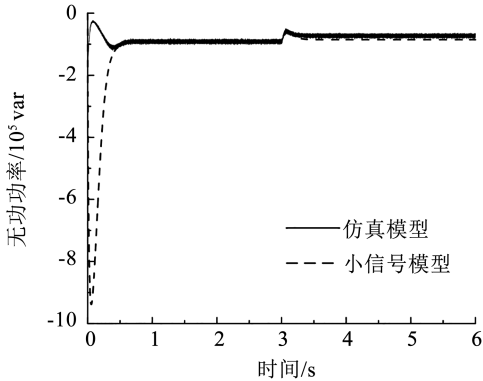
(3 s时风速由 10 m/s 降低为 9 m/s)。对比两者在有功功率、无功功率, 以及直流母线电压的动态响应曲线, 可以观察其呈现出高度一致性, 见图 4。结果表明, 所建立的 DDWT 状态空间小信号模型能够充分反映系统的动态行为, 证明了该模型的准确性和有效性。

### 2.2 稳定性分析

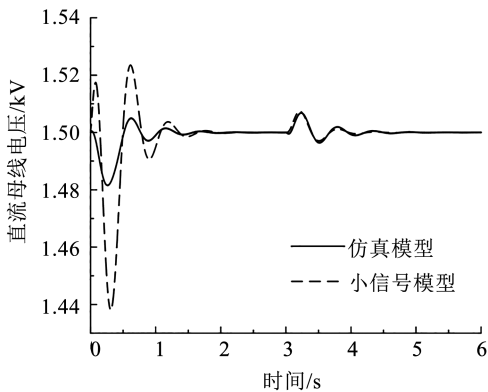
利用 MATLAB 仿真平台, 通过输入系统状态矩阵  $A_F$ , 计算并求得 20 对特征根。再通过绘制主导特征值的根轨迹图, 探讨主要控制参数对系统动态稳定性的影响。DDWT 的特征根及主要状态参与因子见表 1。



(a) 有功功率曲线



(b) 无功功率曲线



(c) 直流母线电压曲线

图4 线性化的状态空间小信号模型对比验证

Fig.4 Comparative validation of linearized state-space small-signal models

表1 DDWT的参与因子

Tab.1 Participating factors of DDWT

特征根	特征根取值	状态变量	参与因子
$\lambda_1$	$-3\ 147.17 + 39\ 655.68i$	$i_{od}/i_{gd}$	0.46/0.50
$\lambda_2$	$-3\ 147.17 - 39\ 655.68i$	其余状态变量	<0.03
$\lambda_3$	$-2\ 953.38 + 24\ 658.42i$	$i_{oq}/u_{gq}$	0.41/0.51
$\lambda_4$	$-2\ 953.38 - 24\ 658.42i$	$i_{gq}$	0.10
		其余状态变量	<0.03
$\lambda_5$	$-2\ 532.59$	$i_{mq}$	1.01
		其余状态变量	<0.03
$\lambda_6$	$-175.76 + 2\ 354.80i$	$i_{gd}/i_{gq}$	0.48/0.42
$\lambda_7$	$-175.76 - 2\ 354.80i$	$i_{od}/i_{oq}$	0.04/0.10
		其余状态变量	<0.03

表1(续)

特征根	特征根取值	状态变量	参与因子
$\lambda_8$	$-2\ 536.86$	$i_{md}$	1.00
		其余状态变量	<0.03
$\lambda_9$	$-142.47$	$z_4/z_5$	0.50/0.11
		$z_7$	0.44
		其余状态变量	<0.03
$\lambda_{10}$	$-69.53 + 7.88i$	$z_4/z_5$	0.18/0.05
$\lambda_{11}$	$-69.53 - 7.88i$	$z_7$	0.29
		$\omega_g/e$ 其余状态变量	0.27/0.12
			<0.03
		$z_1$	0.10
$\lambda_{12}$	$-20.73 + 15.47i$	$w_m/u_{dc}$	0.18/0.09
$\lambda_{13}$	$-20.73 - 15.47i$	$\omega_g/\theta$	0.18/0.40
		$z_7/e$	0.09/0.51
		其余状态变量	<0.03
$\lambda_{14}$	$-4.31 + 24.53i$	$z_1/u_{dc}$	0.42/0.42
$\lambda_{15}$	$-4.31 - 24.53i$	$w_m/\theta$	0.11/0.16
		其余状态变量	<0.03
		$z_1/\theta$	0.05/0.45
$\lambda_{16}$	$-2.70$	$w_m/u_{dc}$	0.69/0.05
		其余状态变量	<0.03
		$z_1/z_5$	0.30/0.48
$\lambda_{17}$	$-10.03$	$z_6$	0.22
		其余状态变量	<0.03
		$z_2$	0.25
$\lambda_{18}$	$-9.97$	$z_5/z_6$	0.51/0.23
		其余状态变量	<0.03
$\lambda_{19}$	$-9.99$	$z_2/z_6$	0.44/0.56
$\lambda_{20}$	$-10.01$	$z_3$	1.00
		其余状态变量	<0.03

图5 为主导模态  $\lambda_{12}$ 、 $\lambda_{13}$  的参与因子分析结果。

主导模态  $\lambda_{12}$ 、 $\lambda_{13}$  (特征根:  $-20.73+15.47i$ ) 的参与因子分析

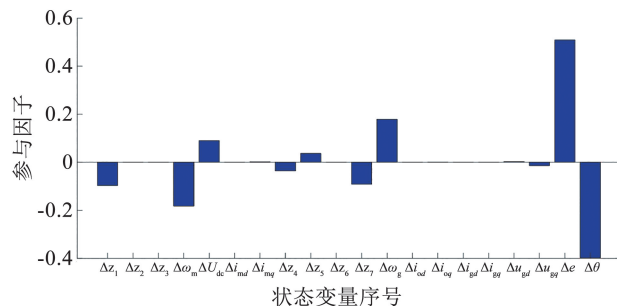


图5 主导模态  $\lambda_{12}$ 、 $\lambda_{13}$  参与因子分析结果

Fig.5 Participation factor analysis results of the dominant modes  $\lambda_{12}$  and  $\lambda_{13}$

由图5可以看出,在主导模态  $\lambda_{12}$ 、 $\lambda_{13}$  中,与虚

拟同步控制相关的状态变量具有较高的参与因子,说明该模式的动态特性由虚拟同步控制主导。图 6 为主导模态  $\lambda_{14}$ 、 $\lambda_{15}$  的参与因子分析结果。由图 6 可以看出,在主导模态  $\lambda_{14}$ 、 $\lambda_{15}$  则由与直流母线电压控制相关的状态变量主导,反映出直流母线电压控制对其动态特性的关键影响。上述分析明确了虚拟同步控制与直流母线电压控制对不同模态的主导作用,为构网型控制优化设计提供了理论依据。

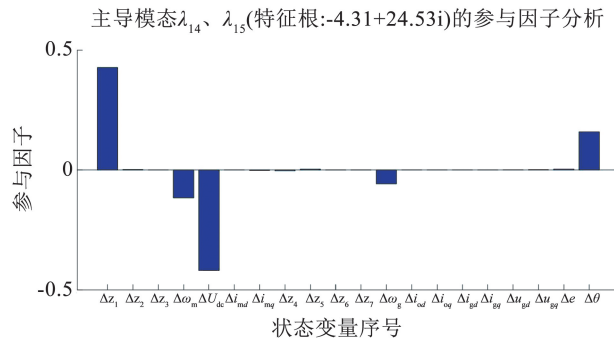


图 6 主导模态  $\lambda_{14}$ 、 $\lambda_{15}$  参与因子分析结果

Fig. 6 Participation factor analysis results of the dominant modes  $\lambda_{14}$  and  $\lambda_{15}$

为分析电网强度短路比 (short circuit ratio, SCR) 对构网型直驱风机并网稳定性的影响,保持其余参数恒定,计算短路比 SCR 从 3 变化到 5 时虚轴附近模态的根轨迹,结果见图 7。由图 7 可以看出:随着 SCR 增大,主导模态的实部向右移动,虚部变化较小,表明系统阻尼特性减弱,稳定性降低,而振荡频率基本保持稳定。

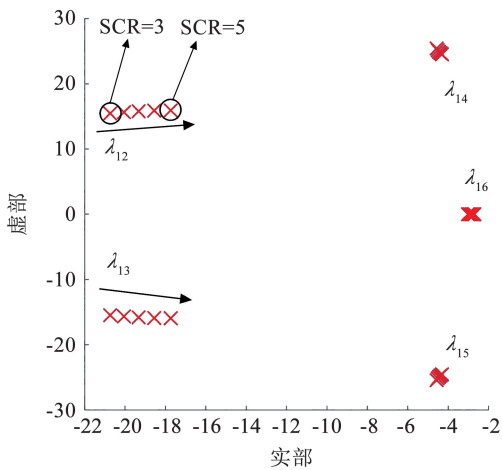


图 7 主导模态随 SCR 变化的根轨迹

Fig. 7 Root locus of dominant modes with the change of SCR

通过 MATLAB 建立时域仿真,对特征模态分析结果进一步验证。在  $t = 3$  s 时施加风速扰动,观察不同 SCR 条件下的有功功率动态响应,结果见图 8。仿真显示,SCR 增大会显著增加功率波形的振荡幅度,振荡频率变化较小,与模态分析结果一致。整体

分析表明,电网强度 SCR 的提升削弱了系统的阻尼性能,降低了系统的动态稳定性。

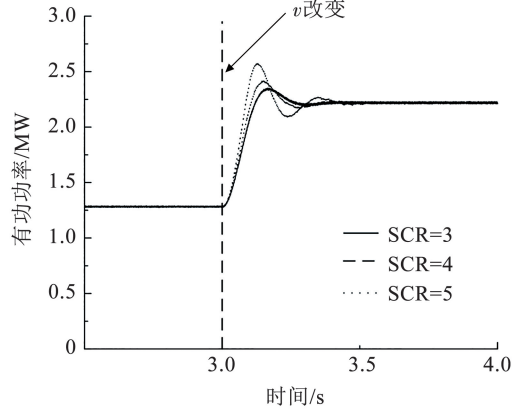


图 8 不同 SCR 下构网型直驱风机有功功率波形图

Fig. 8 Waveforms of grid-forming DDWT's active power under different SCRs

通过特征模态分析和时域仿真可知,构网型直驱风机在低短路比条件下具备良好的弱电网适应性,能够实现稳定并网。然而,风速阶跃变化易引发低频模态振荡,表明阻尼特性减弱,稳定性下降。需进一步优化关键控制参数,以增强低频模态稳定性,提高系统运行可靠性。

### 3 关键参数对低频振荡的影响

构网型直驱风机虽具备良好的弱电网适应性,但在风速阶跃扰动下,其动态响应可能表现为低频振荡特性(振荡频率通常在 0.1 ~ 2.0 Hz),主要由阻尼特性不足引起。为深入研究风速扰动对系统动态稳定性的影响,本文分析关键参数对低频模态稳定性的作用机制,旨在通过优化参数设计提升低频模态的阻尼特性,从而确保系统在风速变化时实现稳定运行。

#### 3.1 直流侧电容参数的影响

为研究直流侧电容参数  $C_{dc}$  对于构网型直驱风机并网稳定性的影响,取短路比 SCR = 3,保持其他参数不变,计算  $C_{dc}$  从 0.3 ~ 0.9 变化时虚轴附近模态的根轨迹,结果见图 9。由图 9 可以看出:随着  $C_{dc}$  增大,主导模态的实部向左移动,表明系统阻尼性能增强,稳定性提高;同时虚部增大,对应振荡频率增加。

通过 MATLAB 仿真验证,在  $t = 3$  s 时施加风速扰动,观察不同  $C_{dc}$  下直流母线电压的响应,结果见图 10。由图 10 可以看出:随着  $C_{dc}$  增大,电压的振荡幅度逐渐减小,衰减速度加快,动态恢复更平稳。结果表明,较大的直流侧电容有助于提升系统的阻尼性能和动态稳定性,与特征模态分析结果一致。

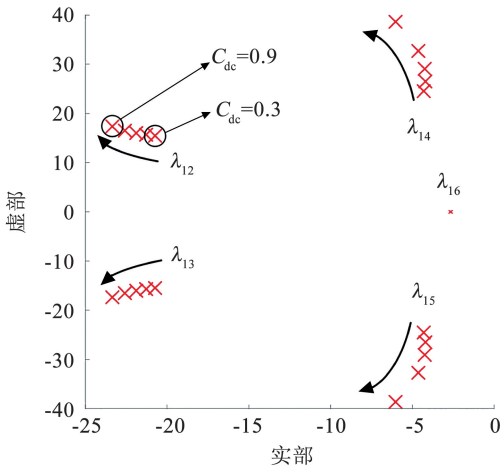


图9 主导模态随  $C_{dc}$  变化的根轨迹

Fig. 9 Root locus of dominant modes with the change of  $C_{dc}$

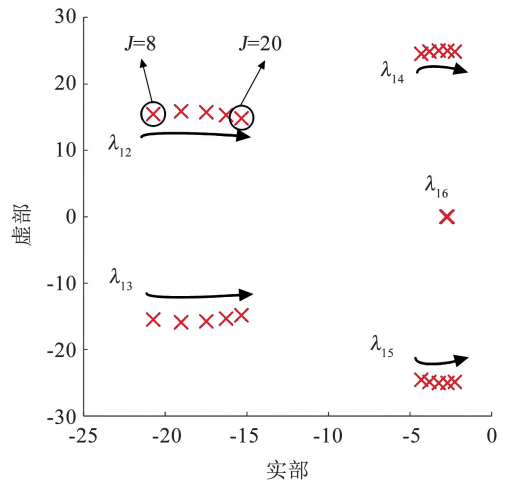


图11 主导模态随  $J$  变化的根轨迹

Fig. 11 Root locus of dominant modes with the change of  $J$

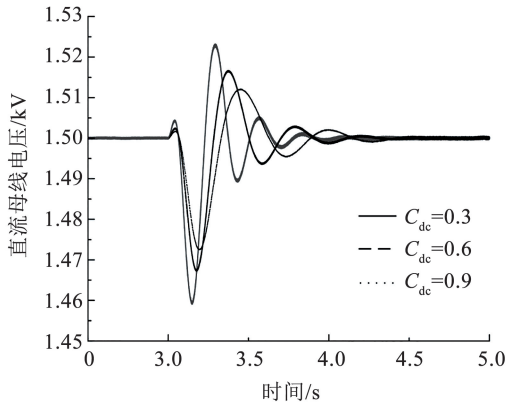


图10 不同  $C_{dc}$  下构网型直驱风机直流母线电压波形图

Fig. 10 Waveforms of grid-forming DDWT's DC bus voltage under different  $C_{dc}$

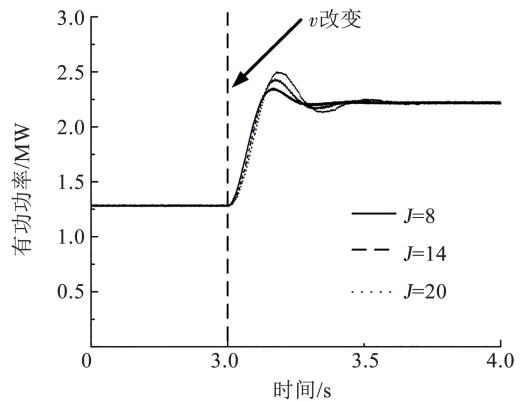


图12 不同  $J$  下构网型直驱风机有功功率波形图

Fig. 12 Waveforms of grid-forming DDWT's active power under different  $J$

### 3.2 虚拟同步控制参数的影响

为研究虚拟惯量  $J$  对于构网型直驱风机并网稳定性的影响,取短路比  $SCR = 3$ ,保持其他参数不变,计算  $J$  从  $8 \sim 20$  变化时虚轴附近模态的根轨迹,结果见图 11。由图 11 可以看出:随着  $J$  的逐渐增大,主导模态的实部向右移动,表明系统阻尼性能减弱,整体稳定性下降;虚部变化幅度较小,振荡频率略有降低。

通过 MATLAB 仿真对特征模态分析结果进行验证,保持其他参数不变,在  $t = 3 \text{ s}$  时施加风速扰动,观察不同虚拟惯量下构网型直驱风机有功功率和直流母线电压的响应曲线。图 12、13 分别为不同虚拟惯量下构网型直驱风机有功功率与直流母线电压波形图。由图 12、13 可以看出:随着虚拟惯量  $J$  的增大,有功功率和直流母线电压的振荡幅度增大,衰减速度减慢,系统恢复时间延长,表明阻尼性能下降,系统稳定性减弱;振荡频率略有降低,与特征模态分析结果一致。

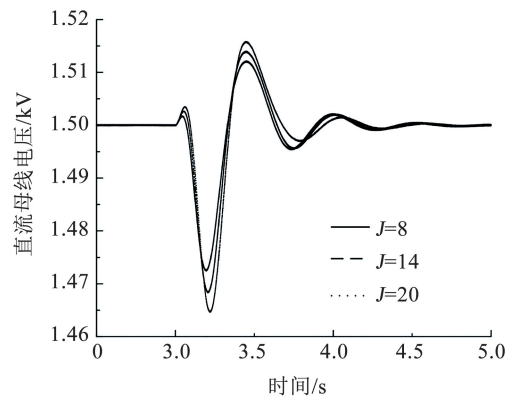


图13 不同  $J$  下构网型直驱风机直流母线电压波形图

Fig. 13 Waveforms of grid-forming DDWT's DC bus voltage under different  $J$

为研究虚拟阻尼  $D$  对于构网型直驱风机并网稳定性的影响,取短路比  $SCR = 3$ ,保持其他参数不变,计算  $D$  从  $600 \sim 400$  变化时虚轴附近模态的根

轨迹,结果见图 14。由图 14 可以看出:随着  $D$  的逐渐减小,主导模态的实部向右移动,虚部略有增加,表明系统阻尼特性减弱,振荡频率略微升高,整体稳定性下降。

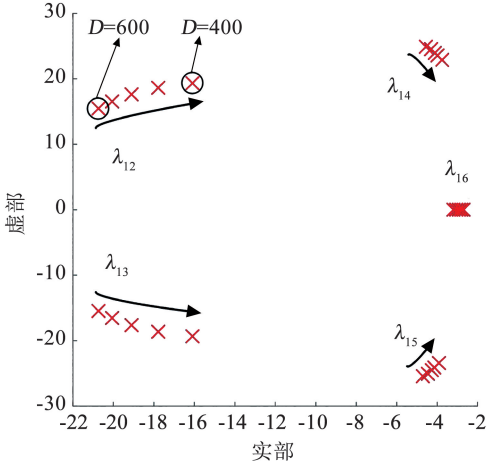


图 14 主导模态随  $D$  变化的根轨迹

Fig. 14 Root locus of dominant modes with the change of  $D$

通过 MATLAB 仿真对特征模态分析结果进行验证,保持其他参数不变,在  $t = 3$  s 时施加风速扰动,观察不同虚拟阻尼下构网型直驱风机有功功率和直流母线电压的响应曲线。图 15、16 分别为不同虚拟阻尼下构网型直驱风机有功功率与直流母线电压波形图。由图 15、16 可以看出,随着虚拟阻尼  $D$  的减小,有功功率和直流母线电压的波形振荡幅度增大,衰减速度明显减慢,系统恢复时间延长,表明阻尼性能下降,系统稳定性降低,与特征模态分析结果一致。

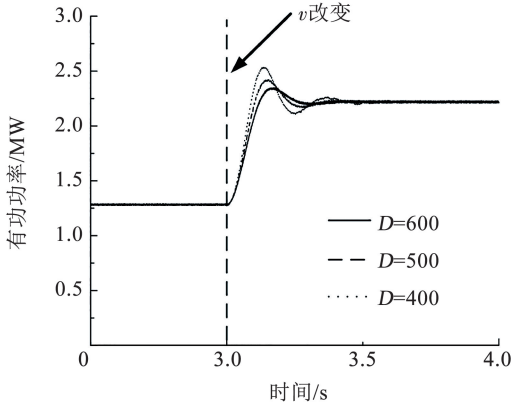


图 15 不同  $D$  下构网型直驱风机有功功率波形图

Fig. 15 Waveforms of grid-forming DDWT's active power under different  $D$

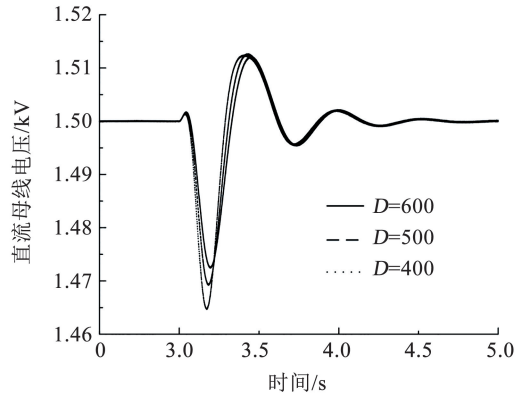


图 16 不同  $D$  下构网型直驱风机直流母线电压波形图  
Fig. 16 Waveforms of grid-forming DDWT's DC bus voltage under different  $D$

### 3.3 虚拟阻抗参数的影响

为研究虚拟电阻  $R_v$  对于构网型直驱风机并网稳定性的影响,取短路比  $SCR = 3$ ,保持其他参数不变,计算  $R_v$  从  $0.2 \sim 0.6$  变化时虚轴附近模态的根轨迹,结果见图 17。由图 17 可以看出:随着  $R_v$  的增大,主导模态的实部向右移动,表明系统阻尼性能减弱,稳定性下降;虚部变化不显著,振荡频率基本保持不变。

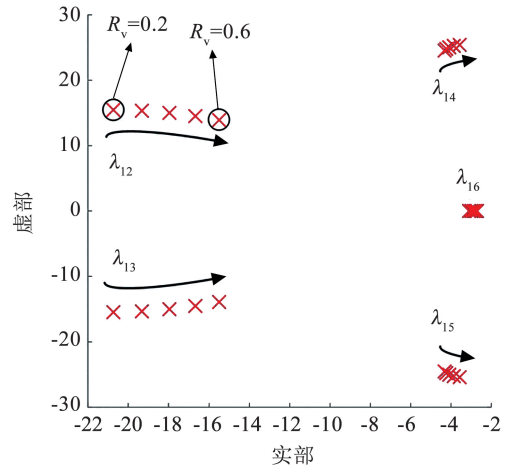


图 17 主导模态随  $R_v$  变化的根轨迹

Fig. 17 Root locus of dominant modes with the change of  $R_v$

通过 MATLAB 仿真对特征模态分析结果进行验证,保持其他参数不变,在  $t = 3$  s 时施加风速扰动,观察不同虚拟电阻下构网型直驱风机有功功率和直流母线电压的响应曲线。图 18、19 分别为不同虚拟电阻下构网型直驱风机有功功率与直流母线电压波形图。由图 18、19 可以看出,随着虚拟电阻  $R_v$  的增大,有功功率波形的振荡幅度略微增加,衰减速度变慢,直流母线电压的动态响应表现为振荡幅度增加和恢复时间延长的特征,表明系统阻尼性能下降,与特征模态分析结果一致。

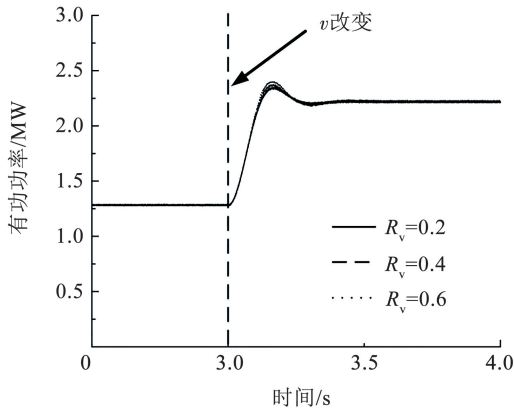


图 18 不同  $R_v$  下构网型直驱风机有功功率波形图

Fig. 18 Waveform of grid-forming DDWT's active power under different  $R_v$

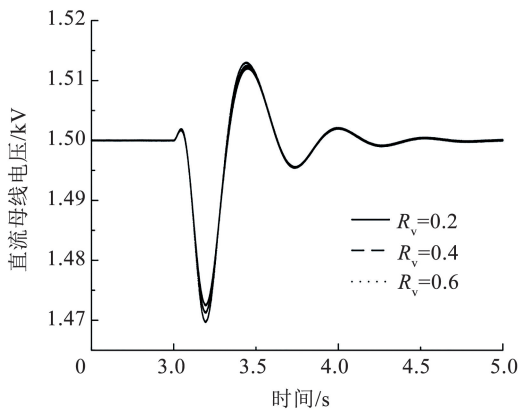


图 19 不同  $R_v$  下构网型直驱风机直流母线电压波形图

Fig. 19 Waveforms of grid-forming DDWT's DC bus voltage under different  $R_v$

为研究虚拟电抗  $L_v$  对于构网型直驱风机并网稳定性的影响,取短路比  $SCR = 3$ ,保持其他参数不变,计算  $L_v$  从 0.004 ~ 0.006 变化时虚轴附近模态的根轨迹,结果见图 20。由图 20 可以看出:随着  $L_v$  的增大,主导模态的实部向右移动,表明系统阻尼减弱,稳定性下降;虚部变化不显著,振荡频率基本保持不变。

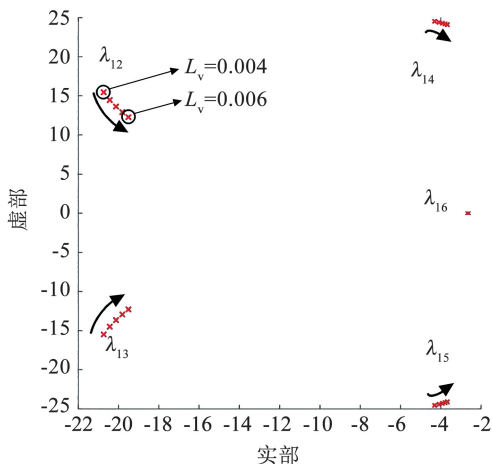


图 20 主导模态随  $L_v$  变化的根轨迹

Fig. 20 Root locus of dominant modes with the change of  $L_v$

通过 MATLAB 仿真对特征模态分析结果进行验证,保持其他参数不变,在  $t = 3 \text{ s}$  时施加风速扰动,观察不同虚拟电抗下构网型直驱风机有功功率和直流母线电压的响应曲线。图 21、22 分别为不同虚拟电抗下构网型直驱风机有功功率与直流母线电压波形图。由图 21、22 可以看出,随着虚拟电抗  $L_v$  的增大,波形振荡幅度显著增大,衰减速度减慢,表明系统阻尼性能下降,与特征模态分析结果一致。

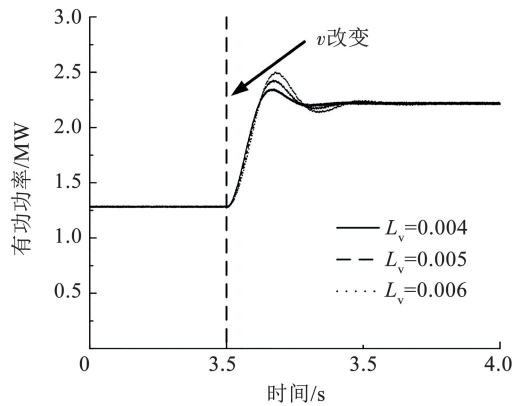


图 21 不同  $L_v$  下构网型直驱风机有功功率波形图

Fig. 21 Waveforms of grid-forming DDWT's active power under different  $L_v$

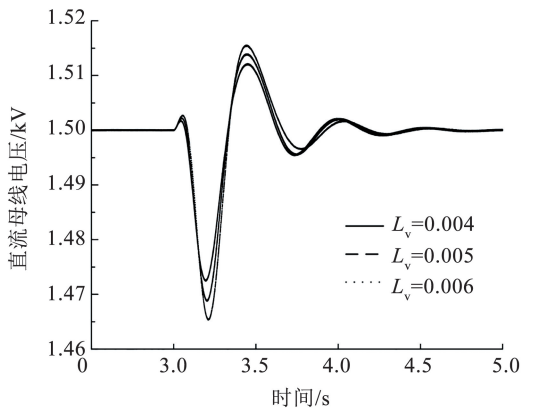


图 22 不同  $L_v$  下构网型直驱风机直流母线电压波形图

Fig. 22 Waveforms of grid-forming DDWT's DC bus voltage under different  $L_v$

综上所述,直流侧电容参数、虚拟同步控制参数,以及虚拟阻抗参数均显著影响构网型直驱风机的低频模态稳定性。通过合理调整这些控制参数,可有效改善低频模态的阻尼特性,从而提高系统稳定性,确保风机在复杂工况下的稳定运行。

### 4 仿真实验

为验证构网型 DDWT 并网系统的小信号模型的准确性,基于 RT-LAB 半实物仿真平台开展了动态仿真试验,具体仿真参数见表 2<sup>[21]</sup>。

表 2 仿真参数

Tab. 2 Simulation parameters

额定功率 $P_n/\text{MW}$	电网额定频率 $w_0/(\text{rad}\cdot\text{s}^{-1})$	额定风速 $v/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	风轮半径 $R/\text{m}$	转子磁通 $\Phi_r/\text{Wb}$	极对数 $P$	定子电阻 $r_s/\Omega$	空气密度 $\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	风能利用 系数 $C_p$	直流母线 电压 $U_{dc}/\text{V}$	直流母线 电容 $C_{dc}/\text{F}$
1.3	314	10	40	2	80	0.006	1.225	0.42	1 500	0.3
电网额定 电压 $U/\text{V}$	空载电压 $U_N/\text{V}$	$J_0/(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$	$D_0/((\text{N}\cdot\text{m}\cdot\text{s})\cdot\text{rad}^{-1})$	虚拟电阻 $R_v/\Omega$	虚拟电感 $L_v/\text{mH}$	滤波电容 $C_f/\mu\text{F}$	滤波电感 $L_f/\text{mH}$	线路电感 $L_g/\text{mH}$	有功调频 系数 $K_p$	无功电压下 垂系数 $D_q$
690	563	8	600	0.2	4	25	0.30	0.32	20	$5 \times 10^{-4}$

4.1 基于 RT-LAB 的风速变化动态响应仿真

图 23 展示了风速发生阶跃变化时系统的动态响应行为。由图 23(a) 可以看出,当风速在 2 s 和 4 s 分别发生上升与下降的阶跃扰动时,系统频率随之波动,显示出明显的动态响应特性。与此对应,图 23(b)、23(c) 分别显示了有功功率和无功功率的低频振荡现象,这表明系统在风速扰动下的动态调节能力。

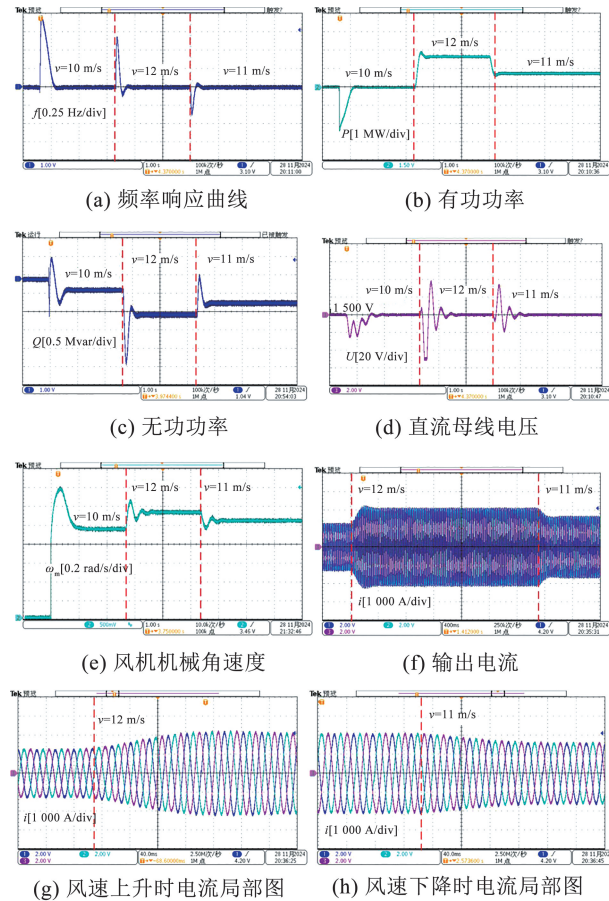


图 23 风速变化时系统响应仿真波形

Fig. 23 Simulated waveforms of system response when wind speed changes

图 23(d) 显示了直流母线电压的响应情况,其在风速扰动后出现短暂波动,但迅速恢复至稳态,体现了系统良好的调压特性。图 23(e) 反映了风机机

械角速度的变化趋势,风速的阶跃扰动导致机械角速度发生调整,以释放或吸收动能。图 23(f) 为输出电流的动态响应波形,可见风速扰动引起的功率调整使输出电流随之变化,系统表现出类似同步发电机的惯量支撑特性。

4.2 基于 RT-LAB 的频率变化动态响应仿真

为验证构网型直驱风机的频率主动支撑能力,在不改变系统参数的情况下,设置电网频率于 2 s 时下降 0.05 Hz,4 s 时恢复。图 24(a) 显示了系统频率的扰动变化过程;图 24(b) 展示了有功功率、无功功率,以及直流母线电压的动态响应;图 24(c) 则反映了风机机械角速度的变化。

由图 24(b) 可以看出,频率下降时,系统通过调节有功功率增量进行频率支撑,无功功率也随之变化以稳定系统电压,同时直流母线电压的波动表明系统具备较好的抗扰动调压能力。图 24(c) 显示,风机控制器在检测到频率下降后,通过降低发电机转速释放动能,为系统提供短时能量支撑。整体结果验证了构网型直驱风机在频率扰动下的动态调节能力和稳定运行特性。

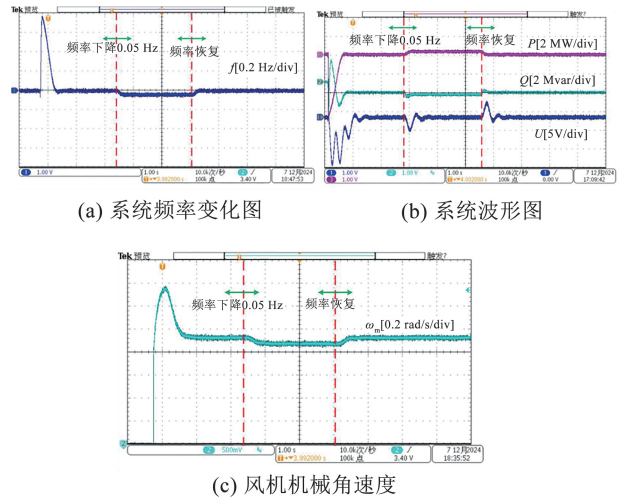


图 24 频率变化时系统响应仿真波形

Fig. 24 Simulated waveforms of system response when frequency changes

## 5 结 论

本文针对构网型 DDWT 并网系统,基于源端动态特性建立小信号模型,经过稳定性分析与仿真验证,得出以下结论:

1) 构网型直驱风机具备较强的弱电网适应性,即使短路比相对较低时,仍能够稳定并网运行,显示出其在弱电网环境下的良好性能。本文通过对风机并网动态特性的深入分析,验证了其在不同电网强度条件下的稳态运行能力,并量化了关键参数对系统稳定性的影响,为风电场在弱电网环境下的适应性评估提供了理论支撑。

2) 研究采用改进的系统建模方法,将直流侧电容的动态作用纳入风电机组并网过程的稳定性分析中。结果表明,直流侧电容参数的变化对直流母线电压的动态响应具有显著影响,进而影响系统的低频振荡和功率输出稳定性。与传统忽略电容影响的模型相比,本文方法更精准地刻画了直流侧电压波动特性,提高了对风电机组动态行为的描述准确性。

3) 网侧参数的调整会改变构网型直驱风机的低频模态特性,进而影响系统的阻尼性能,具体表现为直流母线电压的波动幅度和有功功率的动态响应特性。未来研究将进一步分析多风机并网的动态交互特性及参数优化策略,以提升弱电网环境下系统的整体稳定性和工程适用性。

## 参考文献

- [1] 朱益华, 罗超, 余佳微, 等. 全功率直驱风电电网友好型控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(2): 177  
ZHU Yihua, LUO Chao, YU Jiawei, et al. Grid-friendly control strategy of full power rated direct-drive wind turbines[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(2): 177. DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.230594
- [2] 桑顺, 齐琛, 苗风麟, 等. 附加储能的直驱型风电机组的构网型控制与小信号稳定性分析[J]. 电网技术, 2025, 49(5): 1878  
SANG Shun, QI Chen, MIAO Fenglin, et al. Grid-forming control and small-signal stability analysis of the direct-driven wind turbine generators with energy storage[J]. Power System Technology, 2025, 49(5): 1878. DOI: 10.13335/j.1000-3673.pst.2024.0301
- [3] 刘辉, 于思奇, 孙大卫, 等. 构网型变流器控制技术及原理综述[J]. 中国电机工程学报, 2025, 45(1): 277  
LIU Hui, YU Siqi, SUN Dawei, et al. An overview of control technologies and principles for grid-forming converters [J]. Proceedings of the CSEE, 2025, 45(1): 277. DOI: 10.13334/j.0258-8013.psee.232479
- [4] 蔡旭, 秦垚, 王晗, 等. 风电机组的自同步电压源控制研究综述[J]. 高电压技术, 2023, 49(6): 2478

- CAI Xu, QIN Yao, WANG Han, et al. Review of self-synchronous voltage source control for wind turbine generator [J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(6): 2478. DOI:10.13336/j.1003-6520.hve.20230724
- [5] 秦世耀, 齐琛, 李少林, 等. 电压源型构网风电机组研究现状及展望[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(4): 1314  
QIN Shiyao, QI Chen, LI Shaolin, et al. Review of the voltage-source grid forming wind turbine [J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(4): 1314. DOI:10.13334/j.0258-8013.psee.222095
- [6] 许诒翔, 刘威, 刘树, 等. 电力系统变流器构网控制技术的现状与发展趋势[J]. 电网技术, 2022, 46(9): 3586  
XU Jieyi, LIU Wei, LIU Shu, et al. Current state and development trends of power system converter grid-forming control technology [J]. Power System Technology, 2022, 46(9): 3586. DOI: 10.13335/j.1000-3673.pst.2021.2149
- [7] 袁泉添, 杜正春, 李宇骏, 等. 基于直流电压同步的构网型直驱风机两阶段主动阻尼支撑控制策略[J]. 电网技术, 2023, 47(12): 4995  
YUAN Xiaotian, DU Zhengchun, LI Yujun, et al. Two-stage control of DC voltage-synchronized directly-driven wind turbine for active damping support [J]. Power System Technology, 2023, 47(12): 4995. DOI: 10.13335/j.1000-3673.pst.2022.2448
- [8] 桑顺, 齐琛, 张新松, 等. 永磁直驱风电机组的构网型控制与黑启动[J]. 电网技术, 2022, 46(8): 3168  
SANG Shun, QI Chen, ZHANG Xinsong, et al. Grid-forming control and black start of PMSG-based direct-driven wind turbine [J]. Power System Technology, 2022, 46(8): 3168. DOI:10.13335/j.1000-3673.pst.2021.2370
- [9] 刘钊润, 秦亮, 杨诗琦, 等. 面向新型电力系统的电力电子变流器虚拟同步控制方法评述[J]. 电网技术, 2023, 47(1): 1  
LIU Zhaojun, QIN Liang, YANG Shiqi, et al. Review on virtual synchronous generator control technology of power electronic converter in power system based on new energy [J]. Power System Technology, 2023, 47(1): 1. DOI:10.13335/j.1000-3673.pst.2022.0083
- [10] 马亦卓, 谭贝斯, 徐晋, 等. 基于虚拟同步控制的构网型直驱风机轴系扭振特性分析[J]. 电网技术, 2025, 49(9): 3643  
MA Yizhuo, TAN Beisi, XU Jin, et al. Torsional oscillation characteristics analysis of grid-forming PMSG-based wind turbine system based on virtual synchronous generator control [J]. Power System Technology, 2025, 49(9): 3643. DOI: 10.13335/j.1000-3673.pst.2024.0897
- [11] 刘淇玉, 李永刚, 王月, 等. 构网型并网逆变器状态空间建模及稳定性分析[J]. 华北电力大学学报(自然科学版), 2024, 51(1): 83  
LIU Qiyu, LI Yonggang, WANG Yue, et al. State space modeling and stability analysis of grid-forming inverter [J]. Journal of North China Electric Power University, 2024, 51(1): 83. DOI: 10.3969/j.issn.1007-2691.2024.01.10
- [12] 王健维, 孟建辉, 王毅, 等. 构网型直驱风机的小信号建模及动态频率支撑策略[J]. 电力系统及其自动化学报, 2024, 36(5): 48  
WANG Jianwei, MENG Jianhui, WANG Yi, et al. Small-signal modeling and dynamic frequency support strategy for permanent

- magnetic synchronous generator under grid-forming control [J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2024, 36 (5): 48. DOI: 10.19635/j.cnki.csu-epsa.001329
- [13] 李立, 王佳明, 张青蕾, 等. 兼顾系统频率稳定性和小干扰稳定性的构网型储能参数优化方法 [J]. 电力建设, 2023, 44(12): 125  
LI Li, WANG Jiaming, ZHANG Qinglei, et al. Parameter optimization method of grid-forming energy storage considering system frequency stability and small signal stability [J]. Electric Power Construction, 2023, 44(12): 125. DOI: 10.12204/j.issn.1000-7229.2023.12.011
- [14] 姜静雅. 虚拟同步机建模和特性优化研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2021  
JIANG Jingya. Modeling and characteristic improvement of virtual synchronous generator [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2021. DOI: 10.26944/d.cnki.gbjtu.2022.000259
- [15] 刘辉, 高舜安, 孙大卫, 等. 光伏虚拟同步发电机并网小信号稳定性分析 [J]. 太阳能学报, 2021, 42(2): 417  
LIU Hui, GAO Shun'an, SUN Dawei, et al. Small signal stability analysis of grid-connected photovoltaic virtual synchronous generators [J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2021, 42(2): 417. DOI: 10.19912/j.0254-0096.tynxb.2018-0953
- [16] 曾德银, 姚骏, 张田, 等. 虚拟同步发电机多机并联系统的频率小信号稳定性分析研究 [J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(7): 2048  
ZENG Deyin, YAO Jun, ZHANG Tian, et al. Research on frequency small-signal stability analysis of multi-parallel virtual synchronous generator-based system [J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(7): 2048. DOI: 10.13334/j.0258-8013.psee.191217
- [17] DUAN Pingfan, LI Yang, TIAN Xin, et al. Sequence impedance modeling of VSG-based grid-forming direct-drive PMSG wind turbine [C]//2023 IEEE 2nd International Power Electronics and Application Symposium (PEAS). Guangzhou: IEEE, 2024: 1406. DOI: 10.1109/PEAS58692.2023.10394791
- [18] 褚文从, 刘静利, 李永刚, 等. 考虑源端特性的虚拟同步直驱风机小信号建模与稳定性分析 [J]. 电力自动化设备, 2022, 42(8): 3  
CHU Wencong, LIU Jingli, LI Yonggang, et al. Small-signal modeling and stability analysis of virtual synchronous PMSG considering source characteristics [J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(8): 3. DOI: 10.16081/j.epae.202205047
- [19] 王东泽, 孙海顺, 黄碧月, 等. 基于虚拟同步控制的电压源型直驱风电机组并网稳定性分析 [J]. 高电压技术, 2022, 48(8): 3282  
WANG Dongze, SUN Haishun, HUANG Biyu, et al. Analysis of grid-connected stability of voltage-source-type PMSG-based wind turbine based on virtual synchronous control [J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(8): 3282. DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20211985
- [20] 王玉坤, 张慕婕, 李壮, 等. 构网型直驱风电机组间控制相互作用研究 [J]. 电力自动化设备, 2024, 44(3): 82  
WANG Yukun, ZHANG Mujie, LI Zhuang, et al. Research on control interaction between grid forming direct-drive wind turbines [J]. Electric Power Automation Equipment, 2024, 44(3): 82. DOI: 10.16081/j.epae.202312013
- [21] 王东旭. 构网型 PMSG 风电系统的频率支撑方法及黑启动策略研究 [D]. 北京: 华北电力大学, 2023  
WANG Dongxu. Research on frequency support method and black start strategy of PMSG wind power system under grid forming control [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2023. DOI: 10.27139/d.cnki.ghbdu.2023.000063

(编辑 张红)