

考虑功率耦合特性的构网型风机频率稳定分析方法

陈思怡¹, 苏小玲¹, 赵正奎¹, 陈来军^{1,2}, 裴玮^{1,3}

(1. 青海大学能源与电气工程学院, 西宁 810016; 2. 清华大学电机工程与应用电子技术系, 北京 100084; 3. 中国科学院电工研究所, 北京 100190)

摘要: 构网型风机是提高新能源电力系统频率稳定能力的重要设备,然而构网型风机有功功率和无功功率存在功率耦合问题,导致其支撑能力下降。为分析并网阻抗比对构网型风机功率耦合特性的影响,本文建立了计及功率耦合特性的构网型风机并网小信号模型,通过奈奎斯特稳定性判据确定系统稳定裕度,分析阻抗比变化对系统动态特性的影响。研究表明,构网型风机并网阻抗比减小,其功率耦合呈非线性加深趋势,导致暂态过程振荡发散,直至风机失稳。仿真及实验结果验证了本文理论分析方法的可行性和正确性。

关键词: 构网型风机; 功率耦合; 并网阻抗; 稳定裕度; 频率稳定裕度

Frequency Stability Analysis Method of Grid-forming Wind Turbine Considering Power Coupling Characteristics

CHEN Siyi¹, SU Xiaoling¹, ZHAO Zhengkui¹, CHEN Laijun^{1,2}, PEI Wei^{1,3}

(1. School of Energy and Electrical Engineering, Qinghai University, Xining 810016, China;
2. Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 3. Institute of Electrical Engineering, Chinese Academy of Science, Beijing 100190, China)

Abstract: Grid-forming wind turbine is an important equipment in improving the frequency stability of new energy power systems. However, the coupling between active and reactive power in grid-forming wind turbine reduces its support capability. In order to analyze the influence of grid-forming impedance ratio on the power coupling characteristics of the grid-forming wind turbine, a small signal model of grid-forming wind turbine considering power coupling characteristics is set up in this paper, the system stability margin is determined by using the Nyquist stability criterion, and the influence of impedance ratio variation on system dynamic characteristics is analyzed. The study shows that when the grid impedance ratio of the grid-forming wind turbine decreases, its power coupling shows nonlinear and deepening trend, causing oscillations in the transient process to diverge and eventually leading to turbine instability. The feasibility and correctness of the theoretical analysis in this paper have been verified by both simulation and experimental results.

Keywords: grid-forming wind turbines; power coupling; grid impedance; stability margin; frequency stability margin

0 引言

大型新能源基地的调频资源短缺问题明显,为缓解电网调频压力,新能源发电应具备主动调频能力^[1-2]。构网型风机模拟同步发电机的电磁阻尼特性,可主动响应电网电压频率变化,以支撑电网^[3-4]。然而构网型风机有功-频率与无功-电压之间存在

功率耦合现象,其无功功率因电压波动变化会显著影响有功,导致有功功率剧烈波动,可能会引发新能源机组失稳^[5]。另一方面,新能源基地风电场通常经长距离线路并网,当构网型风机处于这种“弱电网”条件,由耦合并网点(point of coupling, PCC)到大电网的并网阻抗比较大,导致有功功率和无功功率之间强耦合^[6-8],在扰动情况下,构网型风机有功

环可能会发生振荡,而有功功率振荡会通过耦合传导到无功环,使得无功功率也随之振荡,造成系统在受扰动后振荡幅值过大,调节时间过长,严重时振荡发散引起系统失稳^[9-10]。

构网型风机遭受电网强度变化、电压跌落、短路故障等扰动时,可能发生暂态失稳,甚至出现风机连续脱网的现象。诸多学者主要从优化建模方法、优化控制参数、研究功率耦合机理等方面展开研究,以提高新能源机组的稳定性。文献[11]构建了虚拟同步发电机并网系统的小信号模型,通过推导功率耦合特性下的频率闭环传递函数矩阵和全频带输出阻抗解析模型,建立了基于伯德图与极点分布分析的频率稳定性判定框架。该建模方法经文献[12-13]改进后,成功将稳定性评估拓展至复杂电网。针对控制参数优化问题,文献[14-15]揭示了虚拟同步控制中虚拟惯量与阻尼参数的交互作用机制,定量表征了关键控制参数对系统频率稳定域的约束关系。基于此理论发现,文献[16]提出了虚拟阻抗补偿策略,实验验证了该方法对延缓新能源机组在弱电网条件下的失稳进程的有效性。在耦合机理研究方面,文献[17]通过建立风电机组多时间尺度耦合阻抗模型,采用频域阻抗匹配理论揭示了机电动态与电磁暂态交互作用对系统稳定性的影响规律,从能量交互角度阐释了功率耦合强度与频率稳定裕度之间的非线性映射关系,为后续解耦控制策略设计提供了理论依据。

在频率稳定性方面,时域分析法及频域分析法等方法仍是处理新能源机组频率稳定性问题的常用方

法^[18]。文献[19]建立了虚拟同步控制下多环路小信号模型与等效输出阻抗模型,分析了控制环路参数对不同频段阻抗特性的影响,并由阻抗法进行并网小信号稳定性分析。文献[20]考虑了有功和无功功率控制回路之间高阶非线性相互作用。文献[21]提出了一种基于自适应动态虚拟同步阻抗的虚拟同步功率解耦策略,并引入了动态相对增益矩阵加以分析。以上研究为频率稳定分析提供了理论基础和分析方法。

本文基于功率耦合机理,考虑并网阻抗比对构网型风机耦合特性的影响,采用奈奎斯特图分析系统耦合特性下不同阻抗比对构网型风机频率稳定性的影响。最后,通过建立构网型风机并网模型进行时域仿真分析,验证了本文中基于耦合特性下并网阻抗对构网型风机稳定性分析方法的正确性和有效性。

1 基于功率耦合的构网型风机的理论分析

1.1 构网型风力发电结构

构网型风机并网结构如图1所示。主电路由风力发电系统、直流电容、三电平逆变电路、LC滤波电路、传输线路、交流电网组成。控制电路由PCC点采样的三相电压 U_g 及三相电流 I 经功率计算得到瞬时有功功率 P_e 和瞬时无功功率 Q_e ,再将计算出的瞬时功率经一次调频和一次调压得到调制功角 δ 和调制电压 E_r 。最后,结果经过虚拟阻抗控制、电压电流双闭环控制、脉冲宽度调制(pulse width modulation, PWM)单元处理得到调制信号。将该调制信号重新引入三电平逆变电路中,该控制方法即为经典的构网型控制。

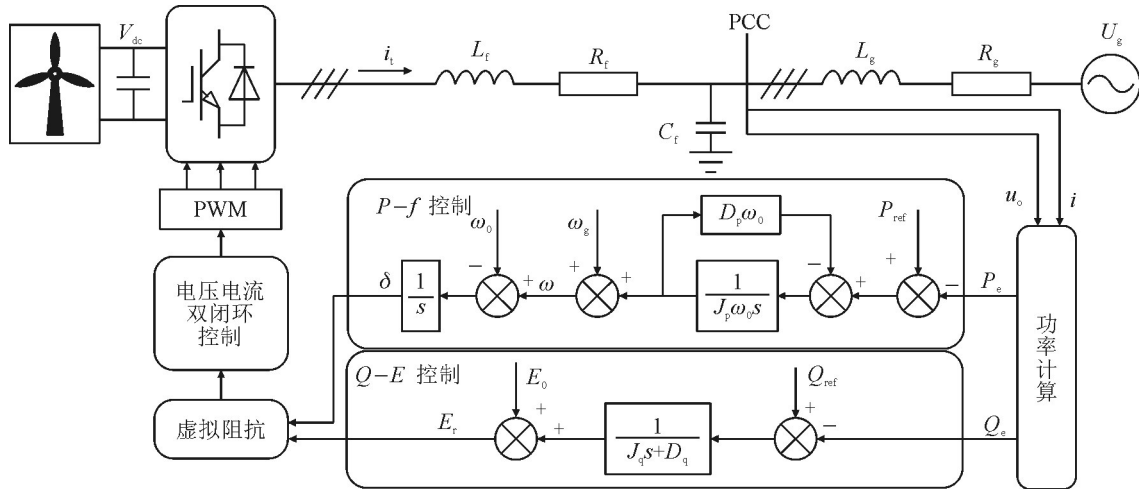


图1 构网型风机并网的拓扑结构
Fig. 1 Grid-forming topology of grid-forming wind turbine

构网型控制通过模拟同步机的二阶转子运动方程和发电机的励磁特性方程,形成风电机组惯量和阻尼,其模拟转子运动方程和模拟励磁方程如式(1)和式(2)所示。

$$\begin{cases} P_e = P_{ref} - J_p \omega_0 \frac{d\omega}{dt} - D_p \omega_0 (\omega - \omega_g) \\ \frac{d\delta}{dt} = \omega - \omega_0 \end{cases} \quad (1)$$

$$Q_e = Q_{ref} - J_q \frac{dE_r}{dt} - D_q(E_r - E_0) \quad (2)$$

式中: ω_0 、 ω 分别表示换流器的额定角速度和实际角速度; ω_g 为交流电网角速度; P_{ref} 、 P_e 分别表示换流器有功功率的参考值和瞬时有功功率; E_0 、 E_r 分别表示换流器机端电压的参考值和虚拟励磁电动势; Q_{ref} 、 Q_e 分别表示换流器无功功率的参考值和瞬时无功功率; J_p 、 J_q 分别为虚拟同步机有功环控制下的惯量系数和无功环控制下的惯量系数; D_p 、 D_q 分别表示虚拟同步机有功环控制下的阻尼系数和无功环下控制的阻尼系数; δ 为换流器的功角。无功控制通常采用积分下垂控制作为虚拟励磁调节器,在模拟传统同步发电机一次调压特性的同时,还能灵活调节系统无功功率输出。

有功环控制和无功环控制下的开环小信号传递函数分别为

$$\begin{cases} G_{PLC} = \frac{\Delta\delta}{\Delta P} = \frac{1}{\omega_0(J_p s + D_p)s} \\ G_{QLC} = \frac{\Delta E_r}{\Delta Q} = \frac{1}{J_q s + D_q} \end{cases}; \text{其中} \begin{cases} \Delta P = \Delta P_{ref} - \Delta P_e \\ \Delta Q = \Delta Q_{ref} - \Delta Q_e \end{cases} \quad (3)$$

在本文中引入虚拟阻抗控制和电压电流双环控制,以实现功率的精确分配和电压电流限幅。虚拟阻抗控制环节在 dq 坐标系下可表示为

$$\begin{cases} u_{od-ref} = E_r - R_v i_d + X_v i_q \\ u_{oq-ref} = 0 - R_v i_q + X_v i_d \end{cases} \quad (4)$$

式中: R_v 和 X_v 分别为虚拟电阻和虚拟电抗。将虚拟阻抗环节输出的电压参考值送入电压电流双闭环,以实现输出电压及电流的快速跟踪、调节。同时将双环的输出即调制波输入 PWM 环节形成构网型三相换流器的触发脉冲。

1.2 阻感性并网阻抗下构网型风机的功率耦合模型

图1的构网型风机并网等效电路及向量关系如图2所示。设电网电压为参考电压, U_g 为电网电压幅值, E 为并网电压, Z_g 为并网阻抗, α 为阻抗角,故 $\alpha = \arctan(X_g/R_g)$, X_g 为电路电抗,即 $X_g = \omega_0 L_g$ 。

由图2可知,PCC点功率可表示为

$$\begin{cases} P_e = \frac{3U_g}{Z_g} [E \cos(\alpha - \delta) - U_g \cos \alpha] \\ Q_e = \frac{3U_g}{Z_g} [E \sin(\alpha - \delta) - U_g \sin \alpha] \end{cases} \quad (5)$$

对公式(5)进行线性化处理,得到

$$\begin{cases} \Delta P_e = \frac{3U_g}{Z_g} E \sin(\alpha - \delta) \Delta\delta + \frac{3U_g}{Z_g} \cos(\alpha - \delta) \Delta E \\ \Delta Q_e = \frac{3U_g}{Z_g} E \cos(\alpha - \delta) \Delta\delta + \frac{3U_g}{Z_g} \sin(\alpha - \delta) \Delta E \end{cases} \quad (6)$$

式中, ΔP 、 ΔQ 、 $\Delta\delta$ 和 ΔE 分别为有功功率、无功功率、功角和电压的小扰动分量,即

$$\begin{bmatrix} \Delta P_e \\ \Delta Q_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{P\delta}(s) & G_P(s) \\ G_{Q\delta}(s) & G_Q(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\delta \\ \Delta E \end{bmatrix} \quad (7)$$

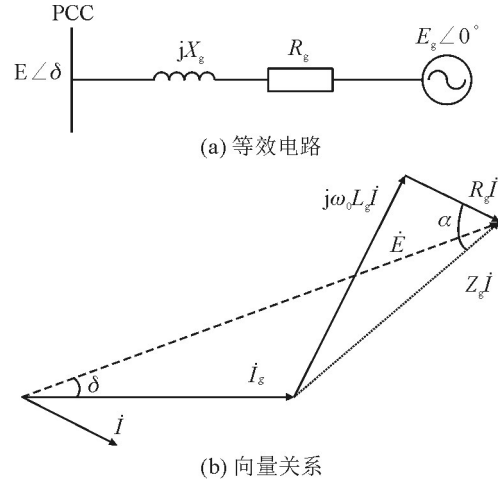


图2 构网型风机并网等效电路及向量分析图
Fig. 2 Grid-forming equivalent circuit and vector analysis diagram of grid-forming wind turbine

在小信号模型中加入功率耦合项,含有功、无功耦合部分的构网型风机并网系统小信号框图如图3所示。

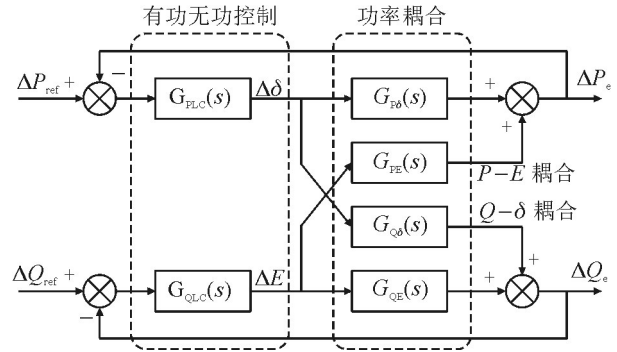


图3 包含有功无功耦合部分的小信号框图
Fig. 3 Small signal block diagram containing active and reactive power coupling

闭环传递函数为

$$\begin{bmatrix} \Delta P_e \\ \Delta Q_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_P(s) & G_{PC}(s) \\ G_Q(s) & G_{QC}(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} \quad (8)$$

其中,

$$\begin{cases} G_{11}(s) = \frac{G_P(s) \times [G_Q(s) + 1] - G_{PC}(s) \times G_{QC}(s)}{[G_P(s) + 1] \times [G_Q(s) + 1] - G_{PC}(s) \times G_{QC}(s)} \\ G_{12}(s) = \frac{G_{PC}(s)}{[G_P(s) + 1] \times [G_Q(s) + 1] - G_{PC}(s) \times G_{QC}(s)} \\ G_{21}(s) = \frac{G_{QC}(s)}{[G_P(s) + 1] \times [G_Q(s) + 1] - G_{PC}(s) \times G_{QC}(s)} \\ G_{22}(s) = \frac{[G_P(s) + 1] \times G_Q(s) - G_{PC}(s) \times G_{QC}(s)}{[G_P(s) + 1] \times [G_Q(s) + 1] - G_{PC}(s) \times G_{QC}(s)} \end{cases} \quad (9)$$

其闭环传递函数为

$$\begin{cases} G_{11}(s) = \frac{G_p(s) \times [G_Q(s) + 1] - G_{PC}(s) \times G_{QC}(s)}{[G_p(s) + 1] \times [G_Q(s) + 1] - G_{PC}(s) \times G_{QC}(s)} \\ G_{12}(s) = \frac{G_{PC}(s)}{[G_p(s) + 1] \times [G_Q(s) + 1] - G_{PC}(s) \times G_{QC}(s)} \\ G_{21}(s) = \frac{G_{QC}(s)}{[G_p(s) + 1] \times [G_Q(s) + 1] - G_{PC}(s) \times G_{QC}(s)} \\ G_{22}(s) = \frac{[G_p(s) + 1] \times G_Q(s) - G_{PC}(s) \times G_{QC}(s)}{[G_p(s) + 1] \times [G_Q(s) + 1] - G_{PC}(s) \times G_{QC}(s)} \end{cases} \quad (10)$$

设定中间变量

$$G_{close}(s) = \begin{bmatrix} G_{11}(s) & G_{12}(s) \\ G_{21}(s) & G_{22}(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{a_{11_1}s + a_{11_0}}{b_3s^3 + b_2s^2 + b_1s + b_0} & \frac{a_{12_2}s^2 + a_{12_1}s}{b_3s^3 + b_2s^2 + b_1s + b_0} \\ \frac{a_{21_1}s + a_{21_0}}{b_3s^3 + b_2s^2 + b_1s + b_0} & \frac{a_{22_2}s^2 + a_{22_1}s + a_{22_0}}{b_3s^3 + b_2s^2 + b_1s + b_0} \end{bmatrix} \quad (11)$$

分母系数表达式为

$$\begin{cases} b_3 = J_p J_q \omega_0 Z_g^2 \\ b_2 = (D_q J_p + D_p J_q) \omega_0 Z_g^2 + 3J_p U_g \omega_0 Z_g \sin(\alpha - \delta) \\ b_1 = D_p D_q \omega_0 Z_g^2 + 3(EJ_q + D_p \omega_0) U_g Z_g \sin(\alpha - \delta) \\ b_0 = 9EU_g^2 + 3D_q EU_g Z_g \sin(\alpha - \delta) \end{cases} \quad (12)$$

分子系数表达式为

$$\begin{cases} \begin{cases} a_{11_1} = 3EJ_q U_g Z_g \sin(\alpha - \delta) \\ a_{11_0} = 9EU_g^2 + 3D_q EU_g Z_g \sin(\alpha - \delta) \end{cases} G_{11} \text{分子系数} \\ \begin{cases} a_{12_2} = 3J_p U_g \omega_0 Z_g \cos(\alpha - \delta) \\ a_{12_1} = 3D_p U_g \omega_0 Z_g \cos(\alpha - \delta) \end{cases} G_{12} \text{分子系数} \\ \begin{cases} a_{21_1} = -3EJ_q U_g Z_g \cos(\alpha - \delta) \\ a_{21_0} = -3D_q EU_g Z_g \cos(\alpha - \delta) \end{cases} G_{21} \text{分子系数} \\ \begin{cases} a_{22_2} = 3J_p U_g \omega_0 Z_g \sin(\alpha - \delta) \\ a_{22_1} = 3D_p U_g \omega_0 Z_g \sin(\alpha - \delta) \\ a_{22_0} = 9EU_g^2 \end{cases} G_{22} \text{分子系数} \end{cases} \quad (13)$$

根据式(8)可以得到具备惯量响应虚拟同步机的功率响应特性公式为

$$\lim_{s \rightarrow 0} G_{close}(s) = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{a_{21_0}}{b_0} & \frac{a_{22_0}}{b_0} \end{bmatrix} \quad (14)$$

式(14)中 $\lim_{s \rightarrow 0} G_{11} = 1$ 、 $\lim_{s \rightarrow 0} G_{12} = 0$ 。表明构网型风机输出有功功率的稳态值不受耦合现象的影响,可实现无差跟踪。而构网型风机的无功功率方面

$$\begin{cases} \lim_{s \rightarrow 0} G_{21}(s) = \frac{-3D_q EU_g Z_g \cos(\alpha - \delta)}{9EU_g^2 + 3D_q EU_g Z_g \sin(\alpha - \delta)} \approx -1 + \frac{1}{1 + K_a Z_g} \\ \lim_{s \rightarrow 0} G_{22}(s) = \frac{9EU_g^2}{9EU_g^2 + 3D_q EU_g Z_g \sin(\alpha - \delta)} \approx \frac{1}{1 + K_a Z_g} \end{cases} \quad (15)$$

式(15)中 $K_a = \frac{D_q}{3U_g}$, 由于 $\lim_{s \rightarrow 0} G_{21} \neq 0$, 表明输出

无功功率的稳态值受有功功率耦合影响。同时,并网阻抗 R/X 增大,无功功率控制环增益 $G_{21}(s)$ 变小, $G_{22}(s)$ 增大; $\lim_{s \rightarrow 0} G_{22} \neq 0$ 意味着无功功率无法实现无差跟踪。

1.3 耦合特性下的稳定性及稳定裕度分析

图4多输入多输出(multiple-input multiple-output, MIMO)系统的开环传递函数 $G_{open}(s)$ 为

$$G_{open}(s) = \begin{bmatrix} G_{PLC}(s) \times G_{P8}(s) & G_{PLC}(s) \times G_{PE}(s) \\ G_{QLC}(s) \times G_{Q8}(s) & G_{QLC}(s) \times G_{QE}(s) \end{bmatrix} \quad (16)$$

其中各部分传递函数表达式为

$$\begin{cases} G_{11_open}(s) = \frac{3U_g E \sin(\alpha - \delta)}{Z_g \omega_0 (J_p s + D_p)s}, G_{12_open}(s) = \frac{3U_g \cos(\alpha - \delta)}{Z_g \omega_0 (J_p s + D_p)s} \\ G_{21_open}(s) = -\frac{3U_g E \cos(\alpha - \delta)}{Z_g (J_q s + D_q)}, G_{22_open}(s) = \frac{3U_g \sin(\alpha - \delta)}{Z_g (J_q s + D_q)} \end{cases} \quad (17)$$

构网型风机并网阻抗比变化,奈奎斯特分析结果如图4所示。

图4中多个奈奎斯特图代表不同的阻抗比,垂直于底面的粗实线表示临界点 $(-1, 0)$, 这是稳定性判据的关键点。奈奎斯特图围绕这个点的圈数与系统的开环极点和零点数量有关,可用来预测闭环系统的稳定性。在图4(a)和图4(b)中,无论阻抗比如何变化,奈奎斯特图都不包含 $(-1, 0)$ 点,即有功相关传递函数仍稳定。在图4(c)和图4(d)中,随着阻抗比减小,奈奎斯特图围绕这个点的圈的范围同样增大,包含 $(-1, 0)$ 点,系统的环境次数 N 、开环传递函数的不稳定极点数 P 之和不等于闭环传递函数的不稳定极点数 Z , 即 $Z \neq P + N$, 表明系统失稳,与理论分析结论一致。特别是,在图4(d)中,随着阻抗比减小,奈奎斯特曲线呈现先包含 $(-1, 0)$ 点,后不包含 $(-1, 0)$ 点的趋势,由此可定量推算出该系统的稳定裕度。

以图4中不同阻抗比下 $G_{22_open}(s)$ 的奈奎斯特分析图为例, $0.7 \leq R/X \leq 3.0$ 的曲线明显包围临界点,表明并网阻抗比在这个范围内时,闭环系统可能失稳。而低阻抗比 ($R/X < 0.7$) 或高阻抗比 ($R/X > 3.0$) 对应的曲线未包围临界点,系统稳定性较高。根据奈奎斯特稳定性判据,稳定裕度主要通过增益裕度 (gain margin, GM) 和相位裕度 (phase margin, PM) 来评估。GM 是指系统增益可增加而不引发失稳的最大倍数 (以 dB 表示)。 $R/X=1.5$ 时,曲线在负实轴的截距接近 -1.4, 即

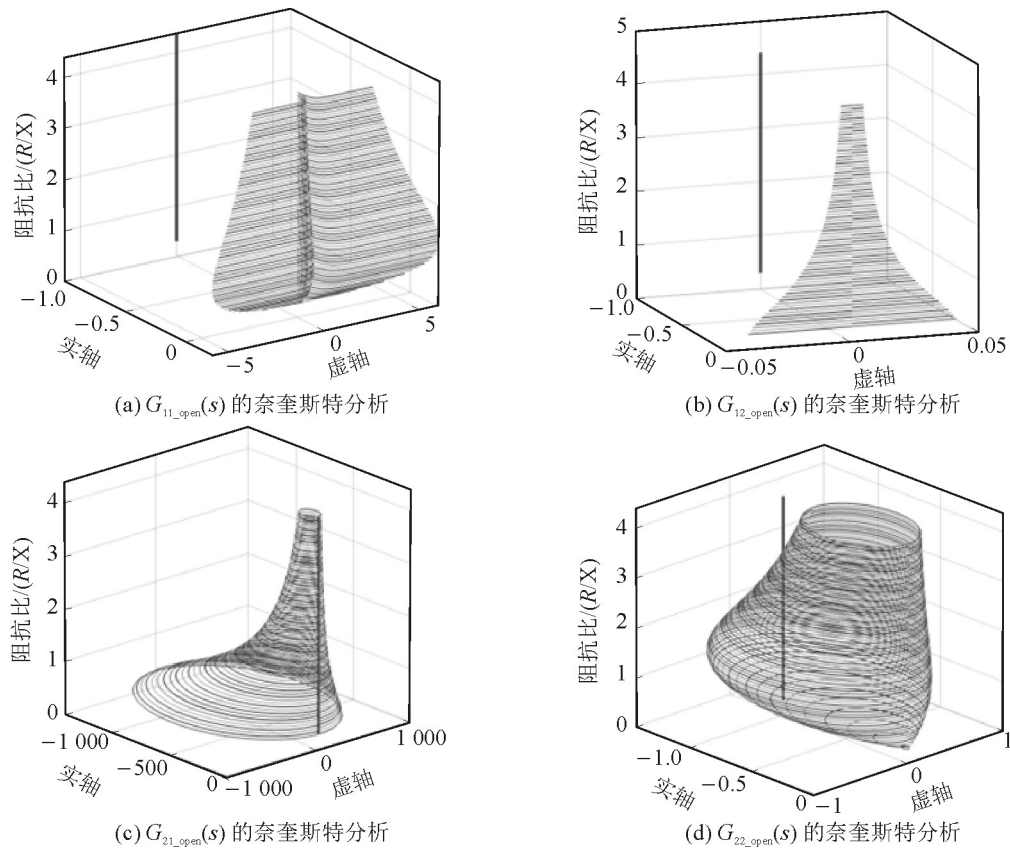


图4 并网阻抗比变化 $G_{\text{open}}(s)$ 的奈奎斯特分析
Fig. 4 Nyquist analysis of $G_{\text{open}}(s)$ with variation of grid-forming impedance ratio

$$GM = 20 \lg \frac{1}{|G_{22_open}(j\omega)|} = 20 \lg \frac{1}{1.4} \approx -2.92 \text{ dB} \quad (18)$$

负增益裕度表明系统已处于失稳状态。而 $R/X=0.5$ 或 $R/X=4.0$ 时,截距接近 -0.6 或 -0.82 ,即 $GM \approx 4.44 \text{ dB}$ 或 $GM \approx 1.72 \text{ dB}$,增益裕度为正数,系统鲁棒性增强。PM 是系统相位滞后而不失稳的最大角度(以度表示)。当阻抗比处于不稳定范围内时,如 $R/X=1.0$ 时 $PM < 20^\circ$,曲线在单位圆附近相位快速接近 -180° ,相位裕度极低,导致暂态响应振荡剧烈。当阻抗比处于稳定范围内时,如 $R/X=4.5$ 时 $PM > 60^\circ$,曲线远离 -180° 相位线,系统动态响应平缓,调节时间缩短。

2 仿真实验

为了验证本文提出的考虑功率耦合特性的构网型风机频率稳定分析方法,基于 Matlab/Simulink 平台搭建图 1 中构网型风机并网系统模型。根据前文式(1)–(2)及式(17)分析,仿真模型中惯量系数的选择需要考虑响应速度和稳定性要求,有功环惯量系数 J_p 取值为 $3 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$,无功环惯量系数 J_q 取值为 $2 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$,在扰动情况下风机在保持稳定运行的同

时可快速调节输出功率支撑电网。同理,有功环阻尼系数 D_p 设定为 $500 \text{ N}\cdot\text{m}$,无功环阻尼系数 D_q 设定为 $172 \text{ N}\cdot\text{m}$,在扰动情况下构网型风机无功功率振荡快速衰减。主要参数见表 1。

表1 构网型风机并网仿真参数表
Table 1 Simulation parameters for grid-forming wind turbine

参数	取值	参数	取值	参数	取值
U_{dc}/V	1 000	E_0/V	380	U_g/V	311
f_n/Hz	50	$\omega_n/(\text{rad/s})$	314	L_f/mH	4
$C_f/\mu\text{F}$	10	R_f/Ω	0.1	P_{ref}/kW	80
Q_{ref}/kvar	0	$J_p/\text{kg}\cdot\text{m}^2$	3	$D_p/\text{N}\cdot\text{m}$	500
$J_q/\text{kg}\cdot\text{m}^2$	2	$D_q/\text{N}\cdot\text{m}$	172	L_g/mH	4
R_{g1}/Ω	0.1	R_{g2}/Ω	0.5	R_{g3}/Ω	0.9

构网型风机稳定运行,2 s 时刻有功功率参考值从 150 kW 增加到 180 kW,如图 5 所示。图 5(a)表明,随着并网阻抗比增大,功角逐渐减小;而图 5(b)中随着并网阻抗比增大,有功功率无明显变化,但频率响应速率明显提高,同时响应时间和超调量也在增大;图 5(c)中随着并网阻抗比增大,输出无功功率明显提高,功率耦合显著加强。

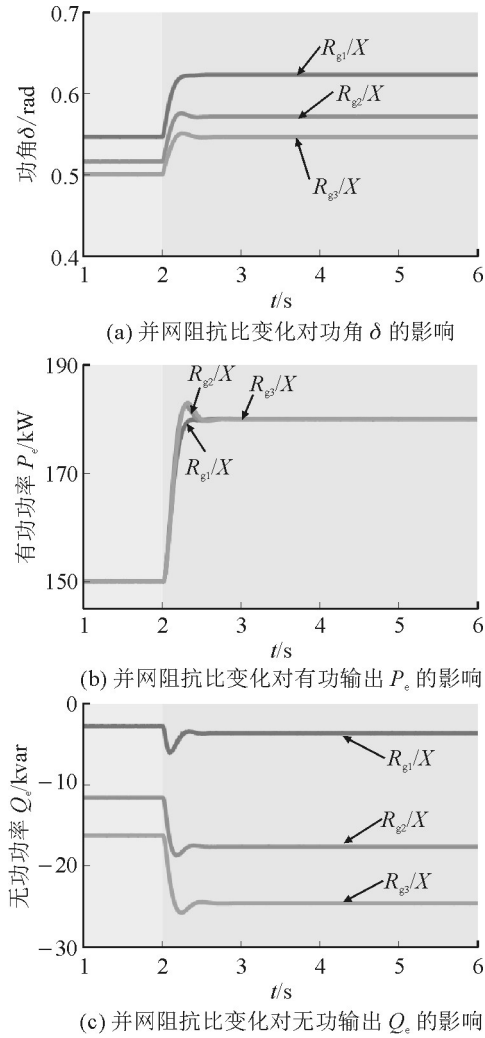


图5 并网阻抗比变化对构网型风机输出特性的影响
Fig. 5 Influence of grid-forming impedance ratio on the output characteristics of the grid-forming wind turbine

3 实验验证

为了进一步验证理论分析及仿真结论,基于RT-LAB 实时仿真平台与 dSPACE 控制器,搭建了构网型风机并网系统的硬件在环(HIL)实验平台,如图6所示。

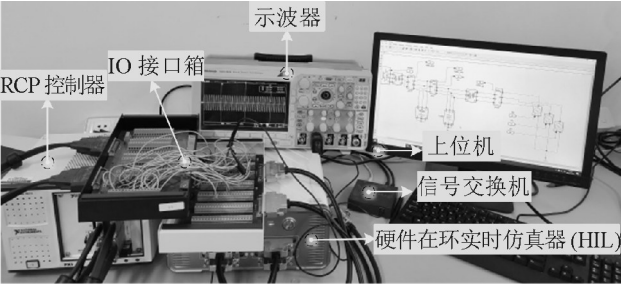


图6 构网型风机并网系统实验测试平台
Fig. 6 Experimental test platform of grid-forming system of the grid-forming wind turbine

构网型风机在不同并网阻抗下的有功功率、无

功功率、和功角的实验波形如图7所示。其中通道1采集系统有功功率波形,通道2采集系统无功功率波形,通道4采集系统功角波形。参数设置与仿真实验设置相同,具体数据见表1。为了直观地观察到构网型风机在扰动发生下系统的有功无功耦合情况,对系统有功功率参考值主动增发30 kW,并采集系统在不同并网阻抗下的响应波形。

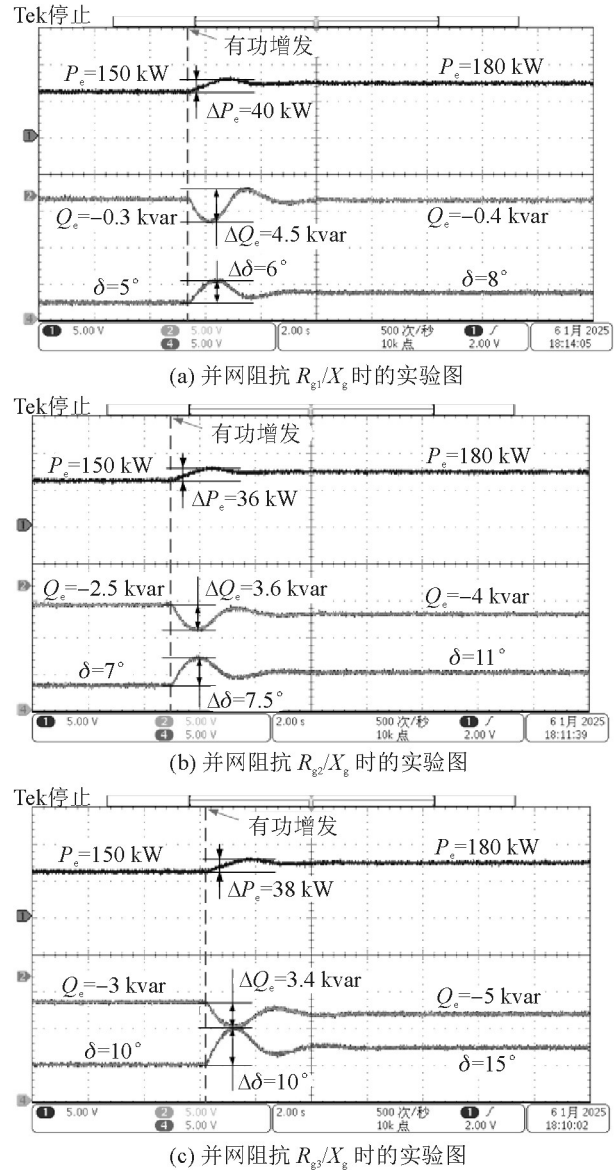


图7 并网阻抗比变化对构网型风机输出特性的影响的实验结果图
Fig. 7 Experimental result diagram on influence of grid-forming impedance ratio on the output characteristics of grid-forming wind turbines

实验结果表明,有功功率参考值增加30 kW,随着并网阻抗比由0.08增加至0.72,有功功率和无功功率响应波形的超调量均减小,系统功角响应波形的超调量增大。实验表明,随着并网阻抗比的增大,构网型风机的功率耦合现象会减弱,系统稳定性增强。

4 结语

针对构网型风机的功率耦合问题,本文基于有功无功平行耦合通道列出了系统包含耦合特性的传递函数,通过奈奎斯特图分析系统动态过程中的耦合特性,可以得到如下结论:

1)根据奈奎斯特图确定了构网型风机的功率耦合与并网阻抗比强相关;且随着阻抗比减小,功率耦合呈非线性加深趋势;

2)构网型风机系统有功功率输出提高,功角增大,无功功率也出现明显变化;并随着并网阻抗比增加,构网型风机功率耦合越深,因有功功率输出增加而引起的无功功率变化也愈显著;

3)除并网阻抗比之外,构网型风机控制参数、负阻尼特性等都会影响功率耦合特性;增加惯量系数可提高构网型风机在频率响应过程中的稳定性;而提高阻尼系数可有效抑制振荡,提高暂态稳定性;而负阻尼特性则会引发风机的自激振荡,导致功率耦合问题更复杂,进一步提高控制难度。

参考文献

- [1] 张勇军,羿应棋,李立涅,等.双碳目标驱动的新型低压配电系统技术展望[J].电力系统自动化,2022,46(22):1-12.
ZHANG Yongjun, YI Yingqi, LI Liying, et al. Prospect of new low-voltage distribution system technology driven by Carbon emission peak and Carbon neutrality targets[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(22): 1-12.
- [2] 高飞翔,钱凯,李敏敏,等.基于自适应阻尼算法的虚拟同步发电机控制策略[J].电力电容器与无功补偿,2021,42(5):109-114.
GAO Feiling, QIAN Kai, LI Minmin, et al. Control strategy of virtual synchronous generator based on self-adaptive damping control algorithm[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2021, 42(5): 109-114.
- [3] 吴泓林,李海啸,李山,等.面向储能容量配置优化的VSG参数协调控制策略[J/OL].电气工程学报,1-10[2025-02-28].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/10.1289.TM.20240227.1343.004.html>.
WU Honglin, LI Haixiao, LI Shan, et al. Coordinated control strategy of VSG parameters for energy storage capacity configuration optimization[J/OL]. Journal of Electrical Engineering, 1-10[2025-02-28]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/10.1289.TM.20240227.1343.004.html>.
- [4] 李军,胡传意,颜辉,等.基于改进多环虚拟同步发电机的电压控制[J].电力电容器与无功补偿,2018,39(6):151-156.
LI Jun, HU Chuanyi, YAN Hui, et al. Voltage control based on improved multiple loop virtual synchronous generator[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2018, 39(6): 151-156.
- [5] 马睿聪,刘福锁,曹永吉,等.电力系统频率动态与功角振荡的耦合特性分析[J].电力工程技术,2023,42(4):102-112.
MA Ruicong, LIU Fusuo, CAO Yongji, et al. Coupling characteristic analysis of power system frequency dynamic and power angle oscillation[J]. Electric Power Engineering Technology, 2023, 42(4): 102-112.
- [6] 付雪姣,胡登辉,刘占彪,等.基于构网型逆变器的光伏有功备用控制策略[J].热力发电,2024,53(8):51-58.
FU Xuejiao, HU Denghui, LIU Zhanbiao, et al. Grid-forming inverter based standby control strategy for PV generation[J]. Thermal Power Generation, 2024, 53(8): 51-58.
- [7] 叶晨,崔双喜,王维庆.一种适用于低压微网的改进下垂控制策略[J].电力电容器与无功补偿,2018,39(6):163-167.
YE Chen, CUI Shuangxi, WANG Weiqing. Improved sag control strategy suitable for low voltage micro-grid[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2018, 39(6): 163-167.
- [8] 方正,黄云辉,严文博,等.构网型变流器功率同步控制稳定性机理分析[J].电力系统自动化,2024,48(19):101-108.
FANG Zheng, HUANG Yunhui, YAN Wenbo, et al. Stability mechanism analysis of power synchronization control for grid-forming converters[J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(19): 101-108.
- [9] 龚振,沈汉铭,谢小荣,等.基于虚拟同步机控制的单级式光伏并网系统强迫低频振荡分析[J].电力系统自动化,2024,48(16):18-29.
GONG Zhen, SHEN Hanming, XIE Xiaorong, et al. Analysis of forced low-frequency oscillation in single-stage grid-connected photovoltaic system based on virtual synchronous generator control[J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(16): 18-29.
- [10] YANG J, ZHAO S, WANG Y, et al. Three-level VSG feed-forward control strategy based on transient damping enhancement[C]//2024 3rd International Conference on Energy, Power and Electrical Technology (ICEPET), 2024, 1782-1785.
- [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,2024,51(1):83-93.
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): 83-93.
- [12] 符杨,陈禹瑾,季亮,等.考虑功率解耦的构网型逆变器

- 的低电压穿越控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(15): 1-13.
- FU Yang, CHEN Yujin, JI Liang, et al. Low voltage ride-through control strategy of a grid-forming inverter considering power decoupling[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(15): 1-13.
- [13] 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): 417-424.
- LIU Hui, GAO Shunan, SUN Dawei, et al. Small signal stability analysis of grid-connected photovoltaic virtual synchronous generators[J]. Acta Energaie Solaris Sinica, 2021, 42(2): 417-424.
- [14] CHEN S, SUN Y, HAN H, et al. Dynamic frequency performance analysis and improvement for parallel VSG systems considering virtual inertia and damping coefficient[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2023, 11(1): 478-489.
- [15] ZHANG Hengyou, YU Shengbao, MENG Fanze. Rapid power support-based frequency response strategy for grid forming inverter in low-inertia power systems[C]//2023 5th International Conference on Power and Energy Technology (ICPET). 2023: 300-305.
- [16] 屈子森, 蔡云旖, 杨欢, 等. 基于自适应虚拟阻抗的虚拟同步机功率解耦控制策略[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(17): 58-66.
- QU Zisen, CAI Yunyi, YANG Huan, et al. Strategy of power decoupling control for virtual synchronous generator based on adaptive virtual impedances[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(17): 58-66.
- [17] 陈建, 任永峰, 孟庆天, 等. 含UDE附加阻尼支路的构网型直驱永磁同步风电机组次同步振荡抑制策略[J]. 电工技术学报, 2024, 39(7): 1985-2000.
- CHEN Jian, REN Yongfeng, MENG Qingtian, et al. Sub-synchronous oscillation suppression strategy for grid-forming direct-drive permanent magnet synchronous generator with uncertainty and disturbance estimator supplementary damping branch[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(7): 1985-2000.
- [18] N. MOHAMMED, H. UDAWATTE, W. ZHOU, et al. Grid-forming inverters: A comparative study of different control strategies in frequency and time domains[J]. IEEE Open Journal of the Industrial Electronics Society, 2024, 5: 185-214.
- [19] 许崇福, 李菀茹, 徐宁一, 等. 应用于储能变流器的虚拟同步发电机阻尼特性分析与改进[J]. 电网技术, 2020, 44(5): 1656-1663.
- XU Chongfu, LI Wanru, XU Ningyi, et al. Analysis and improvement of damping characteristics of virtual synchronous generator control applied to energy storage converter [J]. Power System Technology, 2020, 44(5): 1656-1663.
- [20] LI, X, FENG, et al. Transient stability analysis for grid-tied VSG considering high-order nonlinear interactions between active and reactive power control loops[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2024, 39(6): 6974-6988.
- [21] 张雪原, 颜湘武, 张波, 等. 基于动态相对增益的逆变器耦合评价与解耦方法[J]. 太阳能学报, 2021, 42(7): 110-117.
- ZHANG Xueyuan, YAN Xiangwu, ZHANG Bo, et al. Inverter coupling evaluation and decoupling method based on dynamic relative gain[J]. Acta Energaie Solaris Sinica, 2021, 42(7): 110-117.

作者简介:

陈思怡(2001—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为构网型风机频率稳定分析。

苏小玲(1986—), 女, 副教授, 主要研究方向为新能源发电并网控制。E-mail: suxiaoling@qhu.edu.cn。

赵正奎(1988—), 男, 博士研究生, 主要研究方向为构网型新能源发电并网控制。

陈来军(1984—), 男, 教授, 主要研究方向为新能源电力系统稳定分析与控制。E-mail: chenlaijun@qhu.edu.cn。

裴玮(1982—), 男, 研究员, 主要研究方向为交直流微电网/配电网、综合能源系统。