

引用格式：孙宇新, 孙沁, 杜怿. 基于 VSG 虚拟阻抗可行域的次同步振荡抑制方法 [J]. 南方能源建设, 2025, 12(5): 108-118. SUN Yuxin, SUN Qin, DU Yi. Sub-synchronous oscillation suppression based on VSG virtual impedance feasible domains [J]. Southern energy construction, 2025, 12(5): 108-118. DOI: 10.16516/j.ceec.2024-166.

# 基于 VSG 虚拟阻抗可行域的次同步振荡抑制方法

孙宇新, 孙沁<sup>✉</sup>, 杜怿

(江苏大学电气信息工程学院, 江苏 镇江 201013)

**摘要：**[目的]虚拟同步发电机（Virtual Synchronous Generator, VSG）在弱电网接入下，系统会呈现负阻尼特性，引发次同步振荡，导致系统失稳。虚拟阻抗能够有效抑制次同步振荡，但其不同取值会影响抑制效果。[方法]针对此问题，文章提出在网侧引入虚拟阻抗以抑制次同步振荡的可行域确定方法，以采用VSG控制并网的直驱永磁风电系统为例，通过幅值、相角和电气谐振所对应的电气矢量，揭示次同步振荡的抑制机理。通过选取合适的虚拟阻抗改变系统阻抗特性，构建VSG序阻抗模型，以输出功率和系统稳定性为约束条件，最终确定虚拟阻抗可行域。[结果]通过MATLAB/SIMULINK仿真，选取不同的虚拟阻抗值参数，观测电压电流、功率与频率的变化，验证了虚拟阻抗可行域的有效性与合理性。仿真结果证明弱电网下在网侧引入虚拟阻抗能够抑制次同步振荡，同时在可行域范围内，虚拟电感取值较大、虚拟电阻取值较小的条件下，系统抑制次同步振荡的效果更好。[结论]在弱电网条件下，虚拟阻抗满足其可行域，可确保系统有足够的功率输出能力并有效抑制次同步振荡，从而保障系统稳定运行。

**关键词：**虚拟同步发电机；次同步振荡；弱电网；虚拟阻抗；约束条件

**DOI:** 10.16516/j.ceec.2024-166

**文章编号:** 2095-8676(2025)05-0108-11

**CSTR:** 32391.14.j.ceec.2024-166

**中图分类号:** TM7; TM3



论文二维码

## Sub-Synchronous Oscillation Suppression Based on VSG Virtual Impedance Feasible Domains

SUN Yuxin, SUN Qin<sup>✉</sup>, DU Yi

(School of Electrical Information Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 201013, Jiangsu, China)

**Abstract:** [Objective] The virtual synchronous generator (VSG) system exhibits negative damping characteristics under weak grid connection, which triggers subsynchronous oscillations and leads to system instability. The virtual impedance can effectively suppress the sub-synchronous oscillations, but different parameter values result in varying suppression effects. [Method] To address this problem, this paper proposed a feasible domain determination method for adding virtual impedance on the grid side to suppress the subsynchronous oscillations. Taking the direct-drive permanent magnet wind power system with VSG control as an example, the suppression mechanism was analyzed through amplitude, phase angle, and electrical vectors associated with electrical resonance. Virtual impedance was introduced to alter the system's impedance characteristics, and a VSG sequence impedance model was established. The feasible domain of the virtual impedance was then determined under the constraints of output power and system stability. [Result] The effectiveness and validity of the feasible domain were verified through MATLAB/SIMULINK simulations by selecting different virtual impedance values and observing voltage, current, power and frequency responses. The simulation results demonstrate that introducing virtual impedance at the grid side can effectively suppress subsynchronous oscillations under weak grid conditions. Moreover, better suppression is achieved when the virtual inductance is relatively large and the virtual resistance is relatively small within the feasible domain. [Conclusion] Under weak grid conditions, ensuring that the virtual impedance lies within the feasible domain can provide sufficient

收稿日期: 2024-05-22 修回日期: 2024-06-26 网络首发日期: 2025-08-21

基金项目: 国家自然科学基金项目“谐波励磁型变极永磁电机及驱动控制策略研究”(52177045); 江苏高校优势学科建设工程(四期)资助项目“控制科学与工程”(PAPD-2023-87)

power output capability and suppress subsynchronous oscillations, thereby guaranteeing stable system operation.

**Key words:** virtual synchronous generator; subsynchronous oscillations; weak grid; virtual impedance; constraints

2095-8676 © 2025 Energy China GEDI. Publishing services by Energy Observer Magazine Co., Ltd. on behalf of Energy China GEDI.

This is an open access article under the CC BY-NC license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

## 0 引言

能源安全是经济发展的命脉, 是社会可持续发展的保障。其中, 风力发电作为清洁能源中重要的一环, 虽然可以为电网提供源源不断的能量, 但有时也会给电力系统带来巨大影响。在分布式并网逆变器常用的控制方式中, 虚拟同步发电机 (Virtual Synchronous Generator, VSG) 技术既能模拟电压源特性, 也能实现对电网的电压/惯量支撑, 改善并网系统的稳定性<sup>[1-3]</sup>。尽管 VSG 能够实现无锁相环的自同步运行, 但在继承 SG 优点的同时, 也继承了 SG 瞬态振荡的缺点, 因此 VSG 并网系统的稳定性也会受到一定影响, 甚至存在更加严重的振荡情况<sup>[4-5]</sup>。例如 2015 年, 我国新疆地区一直驱风电场发生了次同步振荡 (Sub-Synchronous Oscillation, SSO) 事故, 导致机组次同步扭振, 触发保护动作而切机。

多年以来, 专家和学者们针对 SSO 的抑制不断深入研究。文献 [6] 中提出了一种用于机侧和网侧的 L2 增益控制器, 且该控制器在不同工况下具有较好的鲁棒性和阻尼性能。文献 [7] 通过一次频率和电压控制来计算 SMES 系统的有功功率和无功功率参考值, 并使用粒子群优化算法计算增益, 可以有效缓解串联补偿传输线电力系统中的次同步振荡, 但该方法优先考虑有功功率。文献 [8] 通过在串联补偿系统中加入统一潮流控制器使系统的等效阻抗发生变化, 使电阻尼得到改善, 从而有效地抑制 SSO, 但其电力电子器件开关频率高, 功率损耗和器件损耗大。由于双馈感应发电机风力发电系统在 SSO 下的控制容易受到谐波信号干扰。文献 [9-10] 提出了一种改进的锁相环, 同时在机侧和网侧上添加准谐振控制器来抑制 SSO, 但传统的 PI 控制和准谐振控制器都有鲁棒性不足的问题。文献 [11] 通过域分离技术识别出稳定的 PI 控制参数安全域, 提高了系统稳定性和响应性, 但对于复杂的工况适应性不足, 难以适用于弱电网下的直驱风机并网系统。文献 [12] 提出将设计的滤波器嵌入转子侧变换

器控制环路中, 以去除反馈信号中包含的次同步分量, 阻断次同步分量的发散过程, 但在低频下次同步电阻增加不明显, 仍然可能发生 SSO。文献 [13] 利用虚拟阻抗实现自适应调节, 提高功率分配精度, 增强系统稳定性, 但对于自适应虚拟阻抗参数的调整范围和影响未进行深入研究。文献 [14] 通过引入阻抗重塑控制器改变虚拟同步机的阻抗特性从而抑制次同步振荡, 但引入阻抗重塑控制器会增加虚拟同步机控制系统的复杂性, 同时对于参数的选择依赖性过高。文献 [15-16] 通过优化电流内环 PI 参数降低 SSO 风险, 但缺少详细的参数调整方法或步骤, 且所建立的模型基于一些简化的假设, 限制了模型在复杂电网条件下的适用性。文献 [17] 利用虚拟阻抗提高 VSG 的稳定性, 但未给出弱电网连接下的虚拟阻抗求解方法, 在预测系统的确切稳定性边界方面存在局限性。

本文通过添加虚拟阻抗抑制系统次同步振荡, 鉴于在弱电网连接下虚拟阻抗取值范围会影响次同步振荡的抑制效果, 甚至引起系统失稳, 研究通过输出功率和稳定性约束条件确定虚拟阻抗的可行域, 并通过仿真验证了方法的正确性和有效性。

## 1 直驱风机主拓扑及控制原理

### 1.1 直驱风机主拓扑结构

直驱风力发电并网系统由风轮机、直驱永磁同步发电机 (Direct Drive Permanent Magnet Synchronous Generator, DD-PMSG)、机侧换流器 (Machine Side Converter, MSC)、网侧换流器 (Grid Side Converter, GSC) 和控制系统等组成, 其主拓扑图如图 1 所示, 其中风轮机先将风能转换为机械能, 通过 PMSG 把机械能转化为电能, MSC 将产生的交流电转化为直流电, 最后通过 GSC 转化成符合并网标准的交流电, 传输到电网。

### 1.2 基于 VSG 算法控制策略

VSG 参考了传统同步发电机 (SG) 的二阶数学模型, 融合了 SG 惯性大、内阻抗大和自同步等优点, 使逆变器能够模拟出类似于 SG 的输出特性,

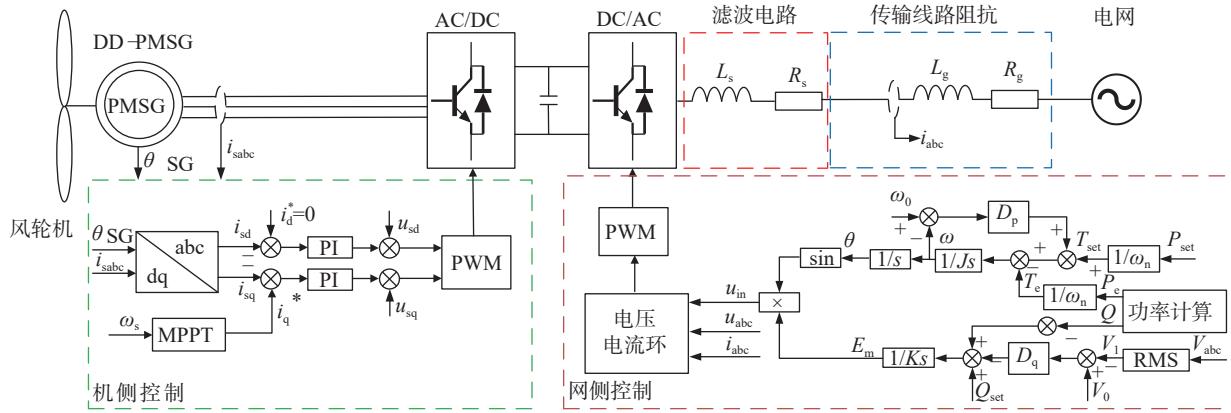


图 1 直驱风机并网主拓扑图  
Fig. 1 Grid-connected topology of direct-drive wind turbine

以满足微电网的运行要求，而目前 VSG 常用的控制方法是有功-频率下垂控制和无功-电压下垂控制。

### 1.2.1 有功频率环路控制与分析

SG 的机械部分是通过转子运动方程来实现的等效转子运动，以 SG 一次调频为基础并选择二阶数学模型，可以得出下列方程：

$$\frac{d\omega}{dt} = T_m - T_e - D_p \Delta \omega \quad (1)$$

$$J = 2HS_b/\omega_0^2 \quad (2)$$

式中：

$T_m$  ——VSG 机械转矩 (N·m)；

$T_e$  ——VSG 电磁转矩 (N·m)；

$D_p$  ——阻尼系数 (N·m·s)；

$\omega$  ——输出角频率 (rad/s)；

$\omega_0$  ——额定角频率 (rad/s)；

$J$  ——转动惯量 ( $\text{kg}\cdot\text{m}^2$ )；

$H$  ——惯性常数；

$S_b$  ——VSG 的基功率 (W)。

SG 通常是调节机械转矩来控制发电机的有功功率，利用频率控制器对电网频率偏差做出调整。根据该原理，建立有功-频率控制框图，如图 2 所示。

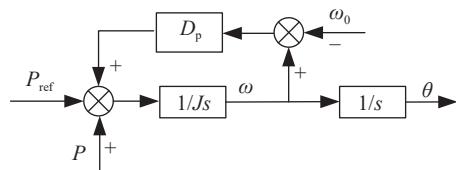


图 2 有功-频率控制框图

Fig. 2 Active-frequency control block diagram

### 1.2.2 无功频率环路控制与分析

与传统并网逆变器的  $P/Q$  控制策略不同，VSG 无功功率控制能够在监测无功功率的同时，参与配网或者微网的电压调节，当电压变化时为接入电网提供所需的无功功率。

VSG 的虚拟电势  $E_m$  的表达式如式 (3) 所示：

$$E_m = E_v + \Delta E_Q + \Delta E_U \quad (3)$$

式中：

$E_v$  ——VSG 离网空载运行时的机端电压 (V)；

$\Delta E_Q$  ——VSG 无功功率调节的输出电压 (V)；

$\Delta E_U$  ——机端调节单元的输出电压 (V)。

对于无功环节，不需要对励磁电流进行控制，只需模拟 SG 的调压特性控制电压调制波，VSG 无功环路的数学方程如式 (4) 所示：

$$\frac{dE_m}{dt} = D_q(V_s - V_0) + Q_{ref} - Q \quad (4)$$

式中：

$K$  ——惯性系数；

$D_q$  ——额定下垂系数；

$V_s$  ——额定电压幅值 (V)；

$V_0$  ——输出电压幅值 (V)。

根据式 (4) 可得 VSG 无功-电压环控制框图，如图 3 所示。

## 2 弱电网下次同步振荡抑制机理

当弱电网发生 SSO 时，削弱振荡幅值是抑制的关键。通过控制发电机输出的有功功率可以调节发电机的阻尼转矩，从而使发电机稳定运行。

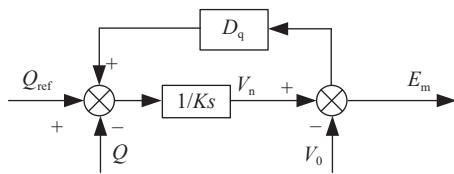


图 3 无功-电压环控制框图  
Fig. 3 Reactive-voltage control block diagram

根据电磁转矩与定子电流的增量关系<sup>[18]</sup>, 可得 SSO 动态稳定器所提供的电气阻尼系数为:

$$D_v = \frac{1}{2} k_v \psi_0 \left[ \alpha_s \cos\left(\theta_v - \theta_g + \lambda - \theta_s + \frac{2\pi}{3}\right) + \beta_s \cos\left(\theta_v - \theta_g - \lambda - \theta_s + \frac{2\pi}{3}\right) \right] \quad (5)$$

$$\mu = \arctan \frac{-\alpha_s \sin(\lambda - \theta_v) + \beta_s \sin(\lambda - \varphi_v)}{\alpha_s \cos(\lambda - \theta_v) + \beta_s \cos(\lambda + \varphi_v)} \quad (6)$$

式中:

$k_v$  ——比例放大系数;

$\lambda$  ——相位偏移角度;

$\psi_0$  ——主磁链 (Wb);

$\alpha_s$  ——次同步电流下的分流系数;

$\beta_s$  ——超同步电流下的分流系数;

$\theta_v$  ——发电机机端电压的初相位;

$\theta_g$  ——连接点电压的初相位;

$\theta_s$  ——次同步电流下的偏移角度。

由式(5)和式(6)可以看出, 电气阻尼系数主要与控制器阻尼电流生成的模块参数  $k_v$ 、 $\lambda$ , 以及系统参数  $\alpha_s$ 、 $\theta_s$ 、 $\beta_s$  有关。由于系统结构与系统的运行状态有关, VSG 的控制参数能够在系统的各种主要运行方式下提供比较理想的阻尼效果, 但在弱电网连接下, VSG 无法实现快速连续调节。

在极坐标系中, 与电压 (幅值) 稳定、同步 (相角) 稳定和电气谐振相对应电气矢量存在 3 个典型的反向: 幅值方向、相位方向、矢量整体变化反向, 文献 [19] 给出了相角振荡、幅值振荡和等幅相振荡的表达式和矢量图, 如图 4 所示, 取初相为  $\pi/2$  时, 相角振荡和幅值振荡对应的矢量表达式分别为式(7)和式(8) :

$$\mathbf{Y}_p = \mathbf{y}_0 e^{j(\omega_0 t + \varphi_0)} + \mathbf{y}_r e^{-\alpha t} \sin(\omega_r t + \varphi_r) \quad (7)$$

$$\mathbf{Y}_m = \mathbf{y}_0 e^{j(\omega_0 t + \varphi_0)} + \frac{1}{2} \mathbf{y}_0 \mathbf{y}_r e^{-\alpha t} \left\{ e^{j(\omega_0 + \omega_r)t + \varphi_r} + e^{j(\omega_0 - \omega_r)t + \varphi_0 - \varphi_r} \right\} \quad (8)$$

将二者叠加, 可得到等幅值相位的矢量表达

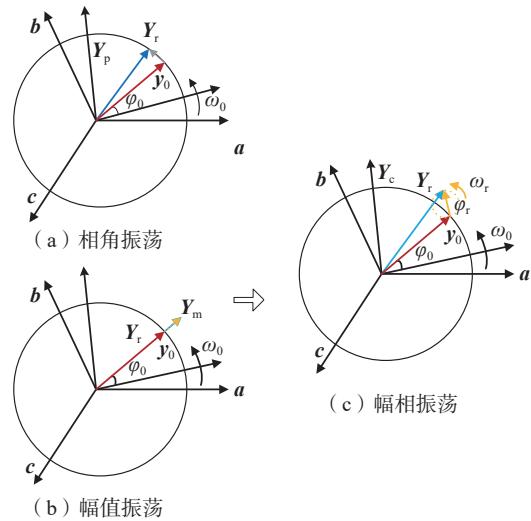


图 4 等幅相振荡的形成  
Fig. 4 Synthesis of equal amplitude phase oscillations

式, 即:

$$\mathbf{Y}_c = \mathbf{y}_0 e^{j(\omega_0 t + \varphi_0)} + \mathbf{y}_r e^{-\alpha t} e^{j[(\omega_0 + \omega_r)t + \varphi_r]} = \mathbf{y}_0 e^{j(\omega_0 t + \varphi_0)} [1 + \mathbf{y}_r e^{-\alpha t} e^{j(\omega_r t + \varphi_r)}] \quad (9)$$

其中, 相角振荡和幅值振荡中电气矢量的幅值和相位会分别存在“周期性波动”, 而幅相振荡可以定义为电气谐振, 其幅值和相位会同时存在“周期性波动”。弱电网连接下产生的 SSO 现象可归于电气谐振, 失稳原因是设备状态变量而导致输出电压电流失稳, 等效电路中存在负电阻, 主导输出变量都是矢量整体, 虚拟阻抗能够改变系统阻抗特性, 抑制电气谐振。

### 3 弱电网下次同步振荡抑制方法

直驱风机与电网相连的电力电子转换器主要在  $dq$  轴中进行矢量控制, 但矢量控制对于电网电压电流的变化很敏感, 所以在弱电网中存在的缺陷被不断放大。由上节分析出弱电网下系统呈现负阻尼特性, 而虚拟阻抗能够改变系统的阻抗特性, 提高 VSG 的稳定性<sup>[17]</sup>, 其控制方法如图 5 所示, 将虚拟阻抗环中得出的  $u_{dqref}$  加入电压电流环的计算中, 以此来抑制弱电网下产生的次同步振荡, 对于其他工况下, 该方法仍存在一定的适用性。但虚拟阻抗取值过大或过小会对系统造成不利影响, 因此在虚拟阻抗的设计过程中存在一定困难。本文将虚拟阻抗与电网阻抗折算至一起以方便分析<sup>[20]</sup>, 并从输出功率和稳定性 2 个方面入手, 求出弱电网条件下虚拟

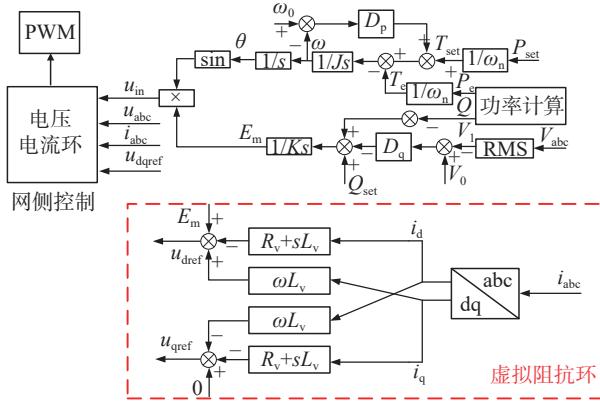


图 5 网侧加入虚拟阻抗控制图

Fig. 5 Control diagram of grid-side virtual impedance

阻抗的可行域，从而使系统能够稳定运行。

### 3.1 输出功率约束条件

虚拟阻抗在提高系统稳定性的同时也会降低 VSG 的功率输出能力<sup>[21]</sup>，尤其是在重载条件下，系统的输出功率不足会导致无稳态工作点，从而引起系统失稳，为此本节求出弱电网下以输出功率为约束条件的虚拟阻抗取值范围。

由图 1 可以得到 VSG 的输出有功功率表达式为：

$$P = \frac{3U_g E \sin \delta}{Z_B} \quad (10)$$

$$Z_B = Z_g + Z_x \quad (11)$$

式中：

$Z_g$  —— 电网阻抗 (mH)；

$Z_x$  —— 虚拟阻抗 (mH)；

$E$  —— VSG 输出电压有效值 (V)；

$U_g$  —— 电网电压有效值 (V)；

$\delta$  ——  $E$  和  $U_g$  之间的夹角。

为避免系统失稳，需要满足系统具有充足输出功率的条件。因此要求在等效电网阻抗  $Z_B$  下系统最大输出功率  $P_{\max}$  大于给定参考功率  $P_{\text{ref}}$ ，即：

$$P_{\max} = \frac{3U_{g\max} E_{\max} \sin \delta_{\max}}{Z_B} \geq P_{\text{ref}} \quad (12)$$

短路比 SCR 用于表示电网强度，其表达式为：

$$\text{SCR} = \frac{U_g^2}{Z_g S_w} \quad (13)$$

式中：

$S_w$  —— 额定功率 (W)。

将式 (11) 和式 (13) 带入式 (12)，化简后

得到输出功率约束条件下虚拟阻抗与短路比的关系式为：

$$Z_{x\max} \leq \frac{3U_{g\max} E_{\max} \sin \delta_{\max}}{P_{\text{ref}}} - \frac{U_g^2}{\text{SCR} \cdot S_w} \quad (14)$$

通过 MATLAB 可以绘制出  $P_{\text{ref}}=100$  kW 下虚拟阻抗与短路比的关系图，如图 6 所示。

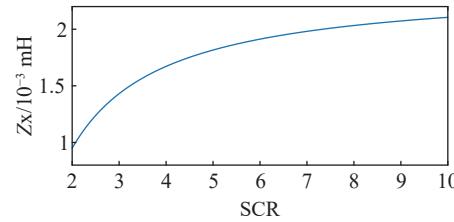


图 6 虚拟阻抗与短路比关系图

Fig. 6 Plot of virtual impedance vs. short-circuit ratio

由图 6 可知，随着 SCR 的增大，即电网强度越大，虚拟阻抗的取值范围越大。当  $\text{SCR}=3$  时， $Z_{x\max}=1.6738$  mH，当  $2 < \text{SCR} < 3$  时，电网为弱连接，即在弱电网下  $Z_x \leq 1.6738$  mH。

### 3.2 稳定性约束条件

电压型 VSG 输出的无功功率通常是由滤波电感  $L_f$  两端电压的差值来决定，而  $L_f$  通常很小，因此电压幅值差也很小。在序阻抗建模时，虚拟电势  $E_m$  可以视为常数，VSG 的正序阻抗和负序阻抗可以通过谐波线性化的方法得到<sup>[22]</sup>，如式 (15) 和式 (16) 所示：

$$Z_{vp}(s) = -\frac{V_p}{I_p} = \frac{0.75U_1 M(s - j2\pi f_1)K(s)e^{j\varphi_{vir}}/\omega_n + sL_f}{1 + 0.75I_1 N(s - j2\pi f_1)K(s)e^{j\varphi_{vir}}/\omega_n} \quad (15)$$

$$Z_{vn}(s) = -\frac{V_n}{I_n} = \frac{0.75U_1 M(s + j2\pi f_1)K(s)e^{-j\varphi_{vir}}/\omega_n + sL_f}{1 + 0.75I_1 N(s + j2\pi f_1)K(s)e^{j(-\varphi_{vir})}/\omega_n} \quad (16)$$

$$M(s) = 1/J_s^2 + D_p s \quad (17)$$

$$N(s) = 1/ks + D_q \quad (18)$$

$$K(s) = \sqrt{2}E_m e^{-1.5T_s s} / [(1 + s/\omega_v)(1 + s/\omega_i)] \quad (19)$$

$$\varphi_{vir} = \arcsin[P_e \omega_n L_f / (E_m U_1)] + \pi/2 \quad (20)$$

式中：

$V_p$  —— 正序电压的频域分量 (V)；

$I_p$  —— 正序电流的频域分量 (V)；

- $V_n$  ——负序电压的频域分量 (A) ;  
 $I_n$  ——负序电流的频域分量 (A) ;  
 $U_1$  ——时域中基频电压幅值 (V) ;  
 $I_1$  ——时域中基频电流幅值 (V) ;  
 $\omega_v$  ——电压信号低通滤波器的截止角频率 (rad/s) ;  
 $\omega_i$  ——电流信号低通滤波器的截止角频率 (rad/s) ;  
 $T_s$  ——开关周期 (s) ;  
 $P_e$  ——VSG 的电磁功率 (W) 。

当 PMSG 接入弱交流电网 ( $2 < \text{SCR} < 3$ ) 时, 如果 VSG 参数按照  $\text{SCR} > 3$  设计且固定不变, 则 VSG 等效阻抗与电网阻抗不匹配, 容性阻抗与电网感性阻抗容易发生谐振, 为了分析系统的频率特性, 引入传递函数  $G(s)$ :

$$G_p(s) = \frac{Z_{vp}(s)}{Z_B(s)} \quad (21)$$

$$G_n(s) = \frac{Z_{vn}(s)}{Z_B(s)} \quad (22)$$

式 (21) 和式 (22) 分别表示正负序阻抗下不同系统阻抗的表达式, 通过建立伯德图可以反映出系统是否满足稳定情况, 下面将做出具体分析。

由 3.1 节可知在弱电网下  $Z_{\text{xmax}}=1.6738 \text{ mH}$ , 而

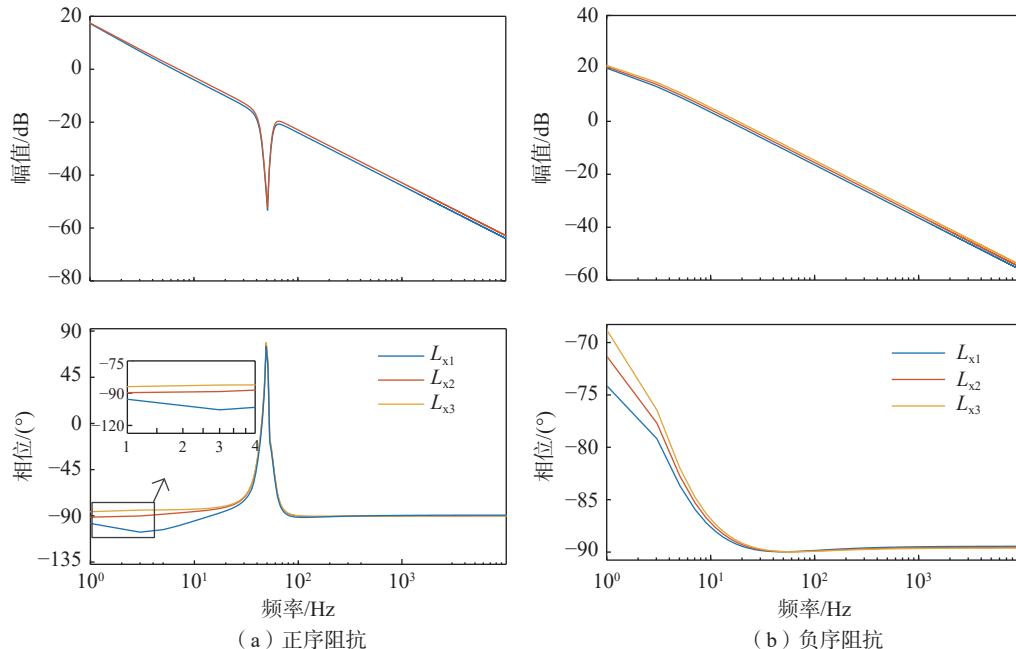


图 7  $L_x$  序阻抗伯德图  
Fig. 7  $L_x$  sequential impedance Bode plot

虚拟阻抗与虚拟电阻和虚拟电感的关系式为:

$$|Z_x|^2 = R_x^2 + (\omega L_x)^2 \quad (23)$$

因此虚拟电阻和虚拟电感均存在最大值, 为寻找阻抗值的其他限制条件, 需要对系统稳定性进一步分析。设置电网阻抗值为  $0.16 \text{ mH}$ , 短路比  $\text{SCR} < 3$ , 模拟弱电网工况。首先研究虚拟电感  $L_x$  的取值范围, 其中虚拟电阻  $R_x$  设为最大值  $1.6738 \text{ m}\Omega$ ,  $L_{x1}$ 、 $L_{x2}$ 、 $L_{x3}$  分别取值  $0.42 \text{ mH}$ 、 $0.43 \text{ mH}$  和  $0.44 \text{ mH}$ , 根据式 (21) 和式 (22) 作出其对应的序阻抗伯德图如图 7 所示。

由图 7 (a) 可知, 当  $L_{x1}=0.42 \text{ mH}$  时, 其相位存在小于  $-90^\circ$  的部分, 此时系统阻尼特性不足, 表现为负阻尼特性, 从而导致系统产生谐振, 引起失稳。当  $L_{x2}=0.43 \text{ mH}$  时, 相位始终大于  $-90^\circ$ , 且  $L_x$  越大阻尼效果越好。由图 7 (b) 可知对于  $L_{x1}$ 、 $L_{x2}$ 、 $L_{x3}$  而言, 系统均能保持稳定, 因此虚拟电感的取值以正序阻抗而定。当虚拟电阻  $R_x$  的取值减小时, 满足系统稳定的  $L_x$  最小值始终小于  $0.43 \text{ mH}$ , 因此在  $R_x \leq 1.6738 \text{ m}\Omega$  条件下,  $L_x \geq 0.43 \text{ mH}$ 。

接下来研究虚拟电阻  $R_x$  的取值范围, 其中虚拟电感  $L_x$  设为最小值  $0.43 \text{ mH}$ ,  $R_{x1}$ 、 $R_{x2}$ 、 $R_{x3}$  分别取值  $1.1 \text{ m}\Omega$ 、 $1.2 \text{ m}\Omega$  和  $1.3 \text{ m}\Omega$ , 同样根据式 (21) 和式 (22) 作出其对应的序阻抗伯德图如图 8 所示。

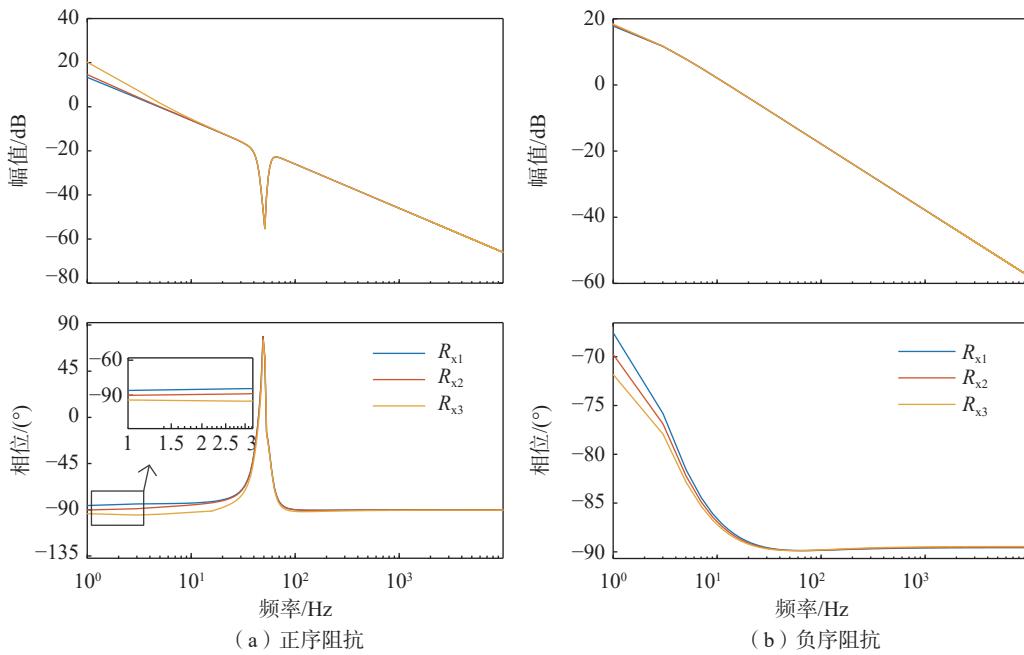


图 8  $R_x$  序阻抗伯德图  
Fig. 8  $R_x$  sequential impedance Bode plot

由图 8 (a) 可知, 当  $R_{x3}=1.3 \text{ m}\Omega$  时, 其相位也存在小于  $-90^\circ$  的部分, 此时系统阻尼特性不足, 表现为负阻尼特性, 从而导致系统产生谐振, 引起失稳。而对于  $R_{x2}=1.2 \text{ m}\Omega$ , 其相位始终大于  $-90^\circ$ , 且  $R_x$  越小阻尼效果越好。由图 8 (b) 可知对于  $R_{x1}$ 、 $R_{x2}$ 、 $R_{x3}$  而言, 系统均能保持稳定, 因此虚拟电阻的取值以正序阻抗而定。当虚拟电感  $L_x$  的取值增大时, 满足系统稳定的  $R_x$  最大值始终大于  $1.2 \text{ m}\Omega$ , 因此在  $L_x \geq 0.43 \text{ mH}$  条件下,  $R_x \leq 1.2 \text{ m}\Omega$ 。

综上所述, 由输出功率和稳定性约束条件可得虚拟阻抗的可行域如图 9 所示。

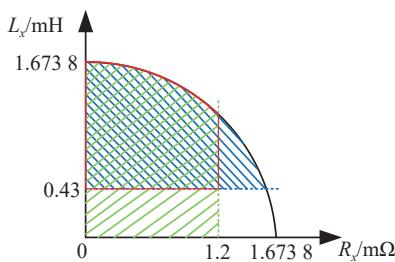


图 9 虚拟阻抗可行域  
Fig. 9 Virtual impedance feasible domain

在图 9 中, 红色实线区域内的部分即为所求得的虚拟阻抗可行域, 在该区域内, 系统在弱电网下能够稳定运行, 下一节将进行仿真验证。

## 4 仿真验证

### 4.1 弱电网下无虚拟阻抗的 SSO 现象

在 MATLAB/Simulink 中建立图 1 所示的系统模型, 系统参数见表 1。与交流电网的连接强度通常通过连接电抗值表示, 电抗越大, 电网强度越弱, SSO 频率越低, 阻尼越小, 系统发生 SSO 的风险越高。

表 1 直驱风电模型系统参数  
Tab. 1 System parameters of direct-drive wind power model

参数	数值	参数	数值
$P_{ref}/\text{kW}$	100	$Q_{ref}/\text{kvar}$	0
$U_g/\text{V}$	380	$f/\text{Hz}$	50
$X_L/\text{H}$	0.506	$X_C/\mu\text{F}$	2.05
$C_{DC}/\mu\text{F}$	100	$L_s/\text{mH}$	80
$U_{DC}/\text{V}$	1 000	$R_s/\text{m}\Omega$	10
$J/(\text{kg} \cdot \text{m}^2)$	15	$D_p$	2000
$K$	6.5	$D_q$	500

系统模拟的电压、电流如图 10 所示。系统在 0.07 s 时完成预同步并与电网连接, 在 2 s 内系统为强电网连接 ( $\text{SCR}=10$ ), 尽管电流在刚开始连接时电网存在较大冲击, 但在 0.12 s 时成功并网并趋于稳定, 最后波形逐渐接近正弦, 系统趋于稳定。

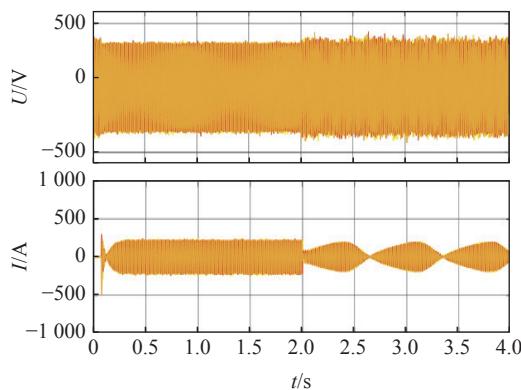


图 10 电压电流波形图

Fig. 10 Voltage and current waveforms

在 2 s 时系统切换至弱电网连接 ( $SCR=2.8$ )，此时系统出现 SSO，电流在并网后产生失稳现象，同时产生次同步谐波振荡，系统失稳，而在弱电网环境中电压相较于强电网连接波形失真更严重，并且存在大量谐波，表明对于弱电网连接而言，强电网连接下的系统参数已无法继续满足系统稳定运行，而虚拟阻抗可以弥补这一缺陷。

系统的功率与频率的并网波形如图 11 所示。从图 11 (a) 中可以看出，有功功率在并网时产生较大冲击，之后逐渐恢复至 100 kW，但在 2~4 s 即弱电网连接下，有功功率出现跌落并产生有规律

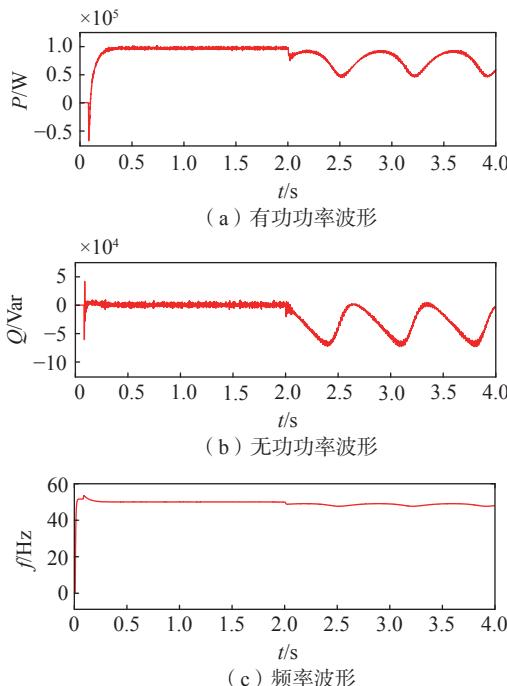


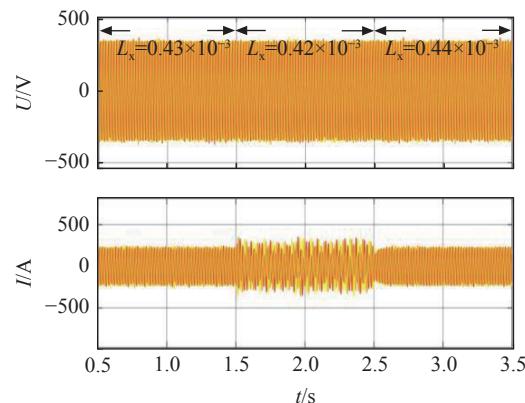
图 11 功率与频率振荡波形图

Fig. 11 Power and frequency oscillation waveforms

的振荡。从图 11 (b) 中可以看出，无功功率在强电网连接下能够保持额定无功运行，在 2 s 后电网吸收电容性无功功率，阻抗呈容性特征，这与电网感性负载形成耦合，从而影响系统稳定。从图 11 (c) 可以看出，系统在 2 s 后发生 SSO，系统频率一直低于 50 Hz，且产生振荡问题。

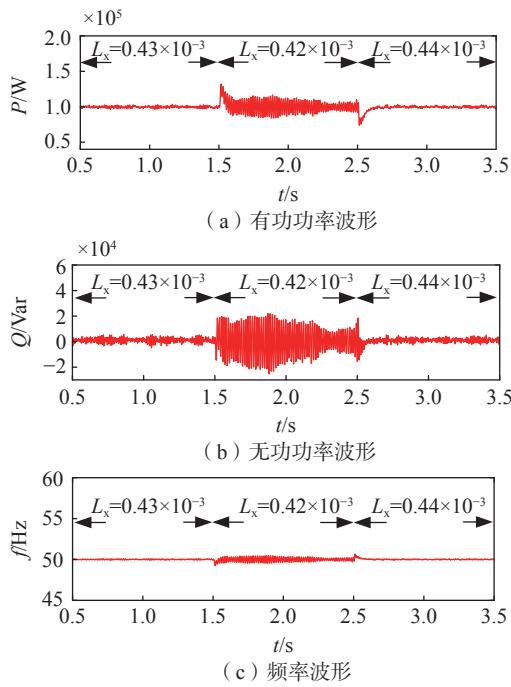
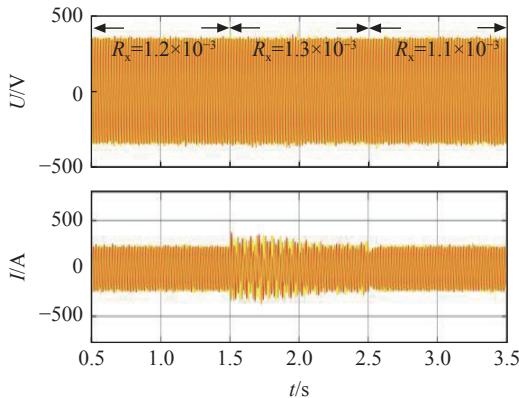
#### 4.2 验证稳定性分析下的可行域

为验证所提方法的有效性，在 MATLAB/Simulink 中建立了加入虚拟阻抗的控制模型，其余条件相同。首先验证虚拟电感  $L_x$  边界的可行性，虚拟电阻取值  $1.6738 \text{ m}\Omega$ ，而对于  $L_x$  在 3 个时间段内选取不同值，其电压电流的波形如图 12 所示，能够看出在虚拟阻抗可行域范围内系统基本能够稳定运行，尽管对于电压而言无明显变化，但在可行域范围外电流明显出现大量谐波，产生振荡，致使系统失稳。

图 12  $L_x$  变化下的电压电流波形图Fig. 12 Voltage-current waveforms under  $L_x$  variation

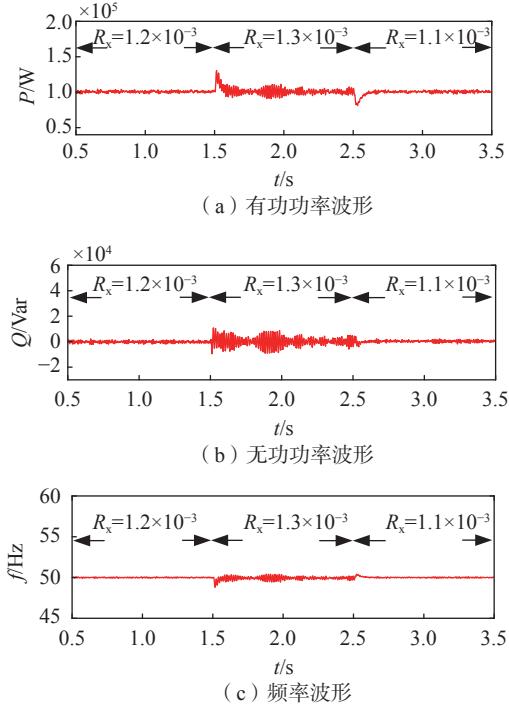
所得功率和频率波形如图 13 所示。图 13 (a) 和图 13 (b) 中，有功功率和无功功率在 1.5 s 出现振荡，在 2.5 s 后，尽管功率略有波动，但系统重新恢复稳定，输出平缓。图 13 (c) 中，系统频率在可行域范围内保持稳定，一直为工频 50 Hz，系统稳定运行，1.5 s 后频率在工频附近产生振荡，系统难以维持稳定状态，从而验证了虚拟电感  $L_x$  在边界范围内抑制次同步振荡的有效性，保证系统稳定运行。

接下来验证虚拟电阻  $R_x$  边界的可行性，虚拟电感  $L_x$  取值  $0.43 \text{ mH}$ ，而对于  $R_x$  同样在 3 个时间段内选取不同值，其电压电流的波形，如图 14 所示，由图可知在虚拟阻抗可行域范围内系统基本保持稳定，对于电压而言整个过程中依然没有明显变化，但在可行域范围外电流产生振荡，并且在 1.5~2 s

图 13  $L_x$  变化下的功率和频率波形Fig. 13 Power and frequency waveforms under  $L_x$  variation图 14  $R_x$  变化下的电压电流波形图Fig. 14 Voltage-current waveforms under  $R_x$  variation

内振荡比较剧烈，而在 2~2.5 s 内逐渐趋于稳定，但仍然存在大量谐波，导致系统失稳，2.5 s 后将  $R_x$  减小，电流能够保持稳定，谐波含量较少。

所得功率和频率波形如图 15 所示。从图 15 (a) 和图 15 (b) 中可以看出，有功功率和无功功率在 1.5 s 后仍然会产生振荡，在 2.5 s 后，尽管功率略有波动，但系统重新恢复稳定，输出平缓。从图 15 (c) 中可以看出系统频率在可行域范围内保持稳定，一直为工频 50 Hz，系统稳定运行，而在 1.5~2.5 s 内

图 15  $R_x$  变化下的功率和频率波形图Fig. 15 Power and frequency waveforms under  $R_x$  variation

频率发生振荡，在 50 Hz 附近上下变化，无法保持稳定，从而证明虚拟电阻  $R_x$  边界符合第三节的分析，且在可行域范围内能够有效抑制系统振荡。

#### 4.3 验证输出功率约束条件下的可行域

本小节验证当虚拟阻抗超出输出功率约束条件所得的取值范围系统的有功功率在弱电网连接下是否能够达到设定值，其中短路比 SCR 设为 2.8，虚拟电感  $L_x$  和虚拟电阻  $R_x$  分别取值 1.8 mH 和 1.8 mΩ，其他参数不变，所得有功功率波形如图 16 所示。可以看出在弱电网连接下，有功功率无法达到 100 kW，同时产生次同步振荡，无法保证系统稳定运行，从而验证了输出功率约束条件的有效性。

通过图 17 及上述仿真发现虚拟阻抗能够使直驱风电并网系统更稳定、抑制能力更强，能够有效

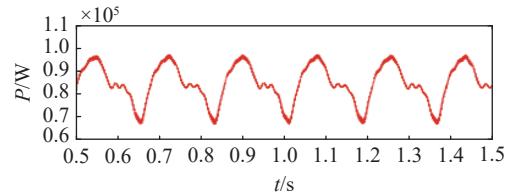


图 16 有功功率波形图

Fig. 16 Active power waveform

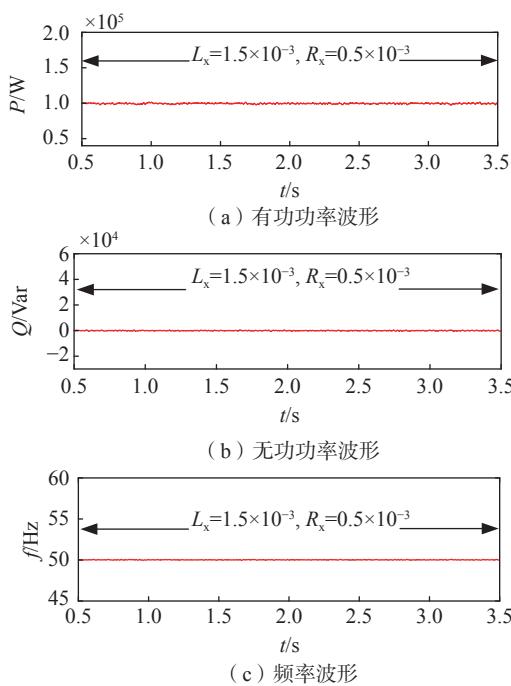


图 17  $L_x$  及  $R_x$  变化下的功率和频率波形

Fig. 17 Power and frequency waveforms under  $L_x$  and  $R_x$  variation

抑制功率与频率振荡问题, 且在可行域范围内  $L_x$  取值大且  $R_x$  取值小, 次同步振荡抑制效果更好, 功率与频率波形几乎无振荡, 所求的虚拟阻抗可行域满足系统稳定运行的条件。

## 5 结论

直驱风力发电并网系统在弱电网连接下系统呈现负阻尼特性, 产生次同步振荡, 针对该问题提出了添加虚拟阻抗的振荡抑制策略, 基于谐波线性化理论推导网侧变流器频域的序阻抗模型, 通过伯德图分析以及功率输出约束条件下短路比与虚拟阻抗的关系求出虚拟阻抗可行域。通过仿真结果可以得出以下结论:

1) 在虚拟阻抗保持在可行域内时, 仿真结果证明系统能够有效地抑制次同步振荡, 并且风力发电并网系统的功率输出能够满足额定要求, 同时在  $L_x$  偏大且  $R_x$  偏小时抑制效果更好。

2) 当虚拟阻抗设置超出其可行域, 系统性能将受到负面影响, 表现为电流、功率和频率的振荡, 且可能导致有功功率无法达到额定要求, 进而引起系统失稳。

## 参考文献:

- [1] MATEVOSYAN J, MACDOWELL J, MILLER N, et al. A future with inverter-based resources: finding strength from traditional weakness [J]. IEEE power and energy magazine, 2021, 19(6): 18-28. DOI: [10.1109/MPE.2021.3104075](https://doi.org/10.1109/MPE.2021.3104075).
- [2] 赵熙临, 龚楚峰, 付波. 一种风电场经 VSC-HVDC 并网的 VSG 变参数负荷频率控制策略 [J]. 高电压技术, 2024, 50(1): 117-126. DOI: [10.13336/j.1003-6520.hve.20230227](https://doi.org/10.13336/j.1003-6520.hve.20230227).
- [3] ZHAO X L, GONG C F, FU B. A VSG variable parameter load frequency control strategy for wind farms connected to the grid by VSC-HVDC [J]. High voltage engineering, 2024, 50(1): 117-126. DOI: [10.13336/j.1003-6520.hve.20230227](https://doi.org/10.13336/j.1003-6520.hve.20230227).
- [4] 张澳, 王鑫达, 张学广. 弱电网下 VSG-DFIG 暂态功角稳定性分析及优化策略 [J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(22): 73-81. DOI: [10.19783/j.cnki.pspc.240426](https://doi.org/10.19783/j.cnki.pspc.240426).
- [5] ZHANG A, WANG X D, ZHANG X G. Transient power angle stability analysis and optimization strategy of a VSG-DFIG in a weak power grid [J]. Power system protection and control, 2024, 52(22): 73-81. DOI: [10.19783/j.cnki.pspc.240426](https://doi.org/10.19783/j.cnki.pspc.240426).
- [6] WEI J, YE S Y, ZHANG Y H, et al. An adaptive control strategy for virtual synchronous generator to damp power system low frequency oscillation [C]// Anon. 2020 Asia energy and electrical engineering symposium (AEEES), Chengdu, China, May 29-31, 2020. Chengdu: IEEE, 2020: 96-100. DOI: [10.1109/AEEE48850.2020.9121470](https://doi.org/10.1109/AEEE48850.2020.9121470).
- [7] 石荣亮, 兰才华, 王国斌, 等. 基于有功前馈补偿的储能 VSG 并网有功振荡抑制策略 [J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(14): 118-126. DOI: [10.19783/j.cnki.pspc.221643](https://doi.org/10.19783/j.cnki.pspc.221643).
- [8] SHI R L, LAN C H, WANG G B, et al. Grid-connected active power oscillation suppression strategy of an energy storage VSG based on active power feed-forward compensation [J]. Power system protection and control, 2023, 51(14): 118-126. DOI: [10.19783/j.cnki.pspc.221643](https://doi.org/10.19783/j.cnki.pspc.221643).
- [9] LI P H, XIONG L Y, MA M L, et al. Energy-shaping  $L^2$ -gain controller for PMSG wind turbine to mitigate subsynchronous interaction [J]. International journal of electrical power & energy systems, 2022, 135: 107571. DOI: [10.1016/j.ijepes.2021.107571](https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2021.107571).
- [10] GIL-GONZÁLEZ W, MONTOYA O D, GARCES A. Control of a SMES for mitigating subsynchronous oscillations in power systems: a PBC-PI approach [J]. Journal of energy storage, 2018, 20: 163-172. DOI: [10.1016/j.est.2018.09.001](https://doi.org/10.1016/j.est.2018.09.001).
- [11] JI H, LING J, YU C H, et al. The influence of UPFC on electrical damping of SSO based on equivalent impedance method [C]// Anon. 2017 International Conference on Computer Systems, Electronics and Control (ICCSEC), Dalian, China, December 25-27, 2017. Dalian: IEEE, 2017: 1676-1681. DOI: [10.1109/ICCSEC.2017.8447052](https://doi.org/10.1109/ICCSEC.2017.8447052).
- [12] LI C X, CHEN Y D, LUO A, et al. An inertia phase locked loop for suppressing sub-synchronous resonance of renewable energy generation system under weak grid [J]. IEEE transactions on power systems, 2021, 36(5): 4621-4631. DOI: [10.1109/TPWRS.2021.3066481](https://doi.org/10.1109/TPWRS.2021.3066481).
- [13] 张冲, 王伟胜, 何国庆, 等. 基于序阻抗的直驱风电场次同步振荡分析与锁相环参数优化设计 [J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(23): 6757-6767. DOI: [10.13334/j.0258-8013.psee.170317](https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.psee.170317).
- [14] ZHANG C, WANG W S, HE G Q, et al. Analysis of sub-

- synchronous oscillation of full-converter wind farm based on sequence impedance and an optimized design method for PLL parameters [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2017, 37(23): 6757-6767. DOI: [10.13334/j.0258-8013.pcsee.170317](https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.170317).
- [11] TRIPATHI S M, TIWARI A N, SINGH D. Controller design for a variable-speed direct-drive permanent magnet synchronous generator-based grid-interfaced wind energy conversion system using D-partition technique [J]. *IEEE access*, 2017, 5: 27297-27310. DOI: [10.1109/ACCESS.2017.2775250](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2017.2775250).
- [12] ZHANG T, HAO Z G, SHU J, et al. Research on SSO suppression of DFIG-based wind farm by impedance scanning [C]// Anon. 2020 IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM), Montreal, QC, Canada, August 2-6, 2020. Montreal: IEEE, 2020: 1-5. DOI: [10.1109/PESGM41954.2020.9282100](https://doi.org/10.1109/PESGM41954.2020.9282100).
- [13] 代维, 秦文萍, 任春光, 等. 含同步机微网中基于解耦下垂的自适应虚拟阻抗控制 [J]. *中国电机工程学报*, 2020, 40(14): 4486-4495. DOI: [10.13334/j.0258-8013.pcsee.190793](https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.190793).
- DAI W, QIN W P, REN C G, et al. Adaptive virtual impedance control based on decoupling droop in microgrid with synchronous generators [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2020, 40(14): 4486-4495. DOI: [10.13334/j.0258-8013.pcsee.190793](https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.190793).
- [14] 杨兴武, 鲍一鸣, 孟致丞, 等. 基于阻抗重塑的虚拟同步机次同步振荡抑制方法 [J]. *中国电机工程学报*, 2024, 44(14): 5538-5547. DOI: [10.13334/j.0258-8013.pcsee.230088](https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.230088).
- YANG X W, BAO Y M, MENG Z C, et al. Restraining method of subsynchronous oscillation in virtual synchronous generator based on impedance reshaping [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2024, 44(14): 5538-5547. DOI: [10.13334/j.0258-8013.pcsee.230088](https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.230088).
- [15] 徐衍会, 曹宇平. 直驱风机网侧换流器引发次/超同步振荡机理研究 [J]. *电网技术*, 2018, 42(5): 1556-1564. DOI: [10.13335/j.1000-3673.pst.2017.2415](https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2017.2415).
- XU Y H, CAO Y P. Research on mechanism of sub/synchronous oscillation caused by GSC controller of direct-drive permanent magnetic synchronous generator [J]. *Power system technology*, 2018, 42(5): 1556-1564. DOI: [10.13335/j.1000-3673.pst.2017.2415](https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2017.2415).
- [16] 宋瑞华, 郭剑波, 李柏青, 等. 基于输入导纳的直驱风电次同步振荡机理与特性分析 [J]. *中国电机工程学报*, 2017, 42(16): 4662-4670. DOI: [10.13334/j.0258-8013.pcsee.162564](https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.162564).
- SONG R H, GUO J B, LI B Q, et al. Mechanism and characteristics of subsynchronous oscillation in direct-drive wind power generation system based on input-admittance analysis [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2017, 42(16): 4662-4670. DOI: [10.13334/j.0258-8013.pcsee.162564](https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.162564).
- [17] SHI K, WANG Y, SUN Y X, et al. Frequency-coupled impedance modeling of virtual synchronous generators [J]. *IEEE transactions on power systems*, 2021, 36(4): 3692-3700. DOI: [10.1109/TPWRS.2021.3050568](https://doi.org/10.1109/TPWRS.2021.3050568).
- [18] 陆晶晶, 肖湘宁, 张剑, 等. 次同步振荡动态稳定器抑制弱阻尼次同步振荡的机理与实验 [J]. *电力系统自动化*, 2015, 39(4): 135-140, 151. DOI: [10.7500/AEPS20140702002](https://doi.org/10.7500/AEPS20140702002).
- LU J J, XIAO X N, ZHANG J, et al. Mechanism and experiment of subsynchronous oscillation-dynamic stabilizer for Suppressing subsynchronous oscillation with weak damping [J]. *Automation of electric power systems*, 2015, 39(4): 135-140, 151. DOI: [10.7500/AEPS20140702002](https://doi.org/10.7500/AEPS20140702002).
- [19] 宫泽旭, 艾力西尔·亚尔买买提, 辛焕海, 等. 新能源电力系统并网设备小扰动稳定分析(二): 导出机理与稳定性分类探讨 [J]. *中国电机工程学报*, 2022, 42(14): 5126-5139. DOI: [10.13334/j.0258-8013.pcsee.212311](https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.212311).
- GONG Z X, YAERMAIMAITI A, XIN H H, et al. Small signal stability analysis of grid-connected equipment in power system (part II): discussion on mechanism derivation and classification of stability [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2022, 42(14): 5126-5139. DOI: [10.13334/j.0258-8013.pcsee.212311](https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.212311).
- [20] 杜燕, 朱轲, 杨向真, 等. 考虑频率耦合的 VSG 虚拟阻抗优化设计 [J]. *高电压技术*, 2022, 48(12): 5057-5067. DOI: [10.1333/j.1003-6520.hve.20220650](https://doi.org/10.1333/j.1003-6520.hve.20220650).
- DU Y, ZHU K, YANG X Z, et al. Optimal design of virtual synchronous generator virtual impedance considering frequency coupling [J]. *High voltage engineering*, 2022, 48(12): 5057-5067. DOI: [10.1333/j.1003-6520.hve.20220650](https://doi.org/10.1333/j.1003-6520.hve.20220650).
- [21] 高长伟, 黄翀阳, 郑伟强, 等. 虚拟阻抗制动可再生能源机组低电压穿越控制 [J]. *电力系统保护与控制*, 2023, 51(10): 142-152. DOI: [10.19783/j.cnki.pspc.221435](https://doi.org/10.19783/j.cnki.pspc.221435).
- GAO C W, HUANG C Y, ZHENG W Q, et al. Low voltage ride-through control of a renewable energy unit with virtual impedance braking [J]. *Power system protection and control*, 2023, 51(10): 142-152. DOI: [10.19783/j.cnki.pspc.221435](https://doi.org/10.19783/j.cnki.pspc.221435).
- [22] WU W H, ZHANG M M, CHEN Y D, et al. Sequence impedance modeling and stability comparative analysis of voltage-controlled VSGs and current-controlled VSGs [J]. *IEEE transactions on industrial electronics*, 2019, 66(8): 6460-6472. DOI: [10.1109/TIE.2018.2873523](https://doi.org/10.1109/TIE.2018.2873523).

#### 作者简介:



孙宇新（第一作者）

1968-, 女, 教授, 博士, 主要研究方向为电力电子化电力系统稳定控制与应用  
(e-mail) [Syx4461@ujs.edu.cn](mailto:Syx4461@ujs.edu.cn).



孙宇新

孙沁（通信作者）

2000-, 男, 硕士, 主要研究方向为虚拟同步发电机技术 (e-mail) [1535852860@qq.com](mailto:1535852860@qq.com).



孙沁

杜怿

1979-, 男, 教授, 博士, 主要研究方向为特种电机系统设计、控制与分析 (e-mail) [duyie@ujs.edu.cn](mailto:duyie@ujs.edu.cn).

(编辑 徐嘉铖)