

# 新能源同步发电机序阻抗建模及其 对宽频振荡的抑制作用

刘纯, 赵牧驰, 汪海蛟, 何国庆, 张明远, 李洋

(可再生能源并网全国重点实验室(中国电力科学研究院有限公司), 北京市 海淀区 100192)

## Modelling of Sequence Impedance of Renewable Energy Synchronous Generator and Its Suppression Effect on Broadband Oscillation

LIU Chun, ZHAO Muchi, WANG Haijiao, HE Guoqing, ZHANG Mingyuan, LI Yang  
(National Key Laboratory of Renewable Energy Grid-integration (China Electric Power Research Institute),  
Haidian District, Beijing 100192, China)

**ABSTRACT:** With many inverter interface generators connected to a power grid, power electronic equipment frequently causes sub/supersynchronous oscillation problems. A new open-winding synchronous machine (OWSM) based renewable energy synchronous generator (RESG) topology for photovoltaic and energy storage is proposed to solve this problem. Based on the proposed topology, a broadband-frequency impedance model is established by applying the frequency-domain small-signal impedance modeling method. The impedance characteristics of the renewable energy synchronous generator topology are analyzed, which shows that the broadband impedance characteristics of the proposed topology are voltage-source characteristics, which do not easily interact with the weak grid to cause sub/super synchronous oscillations. Connecting a certain capacity of renewable energy synchronous generator and traditional grid-following converter to the grid together proves that the proposed topology can inhibit broadband-frequency oscillation and effectively enhance the grid connection characteristics. Finally, an application case of a PV-Farm, which contains regular grid-following converters and proposed renewable energy synchronous generators, is established, which preliminarily demonstrates the potential application of the proposed renewable energy synchronous generator topology for suppressing broadband oscillations.

**KEY WORDS:** open winding synchronous machine; broadband oscillation; oscillation suppression; stability; photovoltaic field station

**摘要:** 针对新能源并网设备频繁发生的次/超同步振荡问题,

基金项目: 国家电网有限公司总部管理科技项目(5100-20215529 3A-0-0-00)。

Project Supported by Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (5100-202155293A-0-0-00).

在前序研究中所提出的一种适用于光伏和储能的全新的基于开绕组同步电机(open winding synchronous machine, OWSM)的新能源同步发电机(renewable energy synchronous generator, RESG)拓扑的基础上, 运用频域小信号阻抗建模方法, 建立了新能源同步发电机拓扑的宽频阻抗模型, 并在仿真中进行了扫频验证, 验证了所提模型的正确性。分析了新能源同步发电机拓扑的阻抗特性, 表明该拓扑的宽频阻抗特性为电压源特性, 不易与电网交互产生振荡。将一定容量的新能源同步发电机和传统跟网型变流器共同接入并网, 可以起到改善并网特性、抑制宽频振荡的作用。分析了将光伏场站中的一部分机组改造为新能源同步发电机后场站阻抗特性的变化。最后, 建立了运用新能源同步发电机对某光伏场站改造的仿真案例, 初步证明了所提新能源同步发电机拓扑在抑制宽频振荡方面的应用潜力。

**关键词:** 开绕组同步电机; 宽频振荡; 振荡抑制; 稳定性; 光伏场站

**DOI:** 10.13335/j.1000-3673.pst.2023.2237

## 0 引言

大力发展新能源, 构建新型电力系统是我国实现双碳目标, 确保能源安全的重要举措。预计到2060年, 新能源发电量占比将超过50%。未来, 我国新能源将实现从辅助电源到主体电源的重大转变, 意味着新能源将成为装机主体和电量主体, 实现从规模上的量变到功能主体的质变。但是, 随着新能源大规模接入电网, 在电网强度较弱时, 新能源并网设备的快速控制特性与电网相互作用, 可能引发宽频振荡问题, 典型案例如我国新疆哈密、河北沽源等地电网频发的次/超同步振荡问题, 宽频振荡问题制约新能源外送能力, 影响电力系统安全稳

定运行<sup>[1-2]</sup>。

新能源发电的装置特性及其与弱同步电网交互作用是导致宽频振荡问题的主要原因。目前主流的风、光伏发电所采用的基于锁相控制的电力电子化的并网方式在弱同步电网下导致新能源发电变流器多回路控制的宽频动态与弱电网阻抗特性交互作用，引发次同步到超同步频率范围内的振荡现象。按照解决思路的不同，目前存在 2 种解决新能源发电装置振荡的主流方案：

1) 从新能源发电控制侧入手，通过改造新能源发电装置的控制特性来提升稳定性，例如文献[3]提出一种针对锁相环控制参数的优化设计方法以降低系统次同步振荡风险。文献[4-5]针对当前阻抗重塑技术的局限性，在计及频带重叠效应前提下对各控制器参数优化设计，实现了基于宽频阻抗重塑的振荡抑制。文献[6-7]基于考虑功率外环的双馈机组(doubly-fed induction generator, DFIG)序阻抗模型揭示了发生次、超同步振荡机理，为基于阻抗重塑的振荡抑制方法提供了理论依据。针对风电场经柔性直流输电(modular multilevel converter HVDC, MMC-HVDC)送出系统，文献[8]运用阻抗建模方法，揭示了风电场经 MMC-HVDC 送出系统宽频振荡的机理。除了改造控制参数的策略以外，还可以引入构网型控制，增强新能源发电装置对频率和电压的支撑作用<sup>[9]</sup>，文献[10]提出在变流器的控制中引入同步发电机的转子运动方程和电磁暂态方程，使得变流器具备了电压源的特性，可以为电网提供频率和电压支撑。文献[11]提出无需锁相环频率检测的电压源型自同步控制技术，可模拟同步机给系统提供惯量，但如何实现电网的有效主动支撑还有待深入研究。新能源侧的改进主要是控制特性的改进，从拓扑上改进的方案较少，并且随着电网强度的降低，改进控制的方式受暂稳态控制目标的双重约束，设计边界逐步缩小，在解决宽频振荡问题上具有局限性。

2) 从电网侧入手改造，通过在电网侧加装调相机来增强电网强度。文献[12]比较了调相机与静止无功补偿器(static var compensator, SVC)、静止同步补偿器(static synchronous compensator, STATCOM)等基于电力电子设备的动态无功补偿装置之间的差异，说明了调相机具有较好的动态无功支撑能力与暂态电压调节能力。文献[13]建立了含调相机的多馈入系统动态模型，从提升系统稳定裕度的角度研究了调相机优化选址的方法。调相机成本相对较高，调相机不具备有功控制能力，在弱

电网故障下可能引入暂态功角失稳风险<sup>[14]</sup>。

在上述 2 种解决方案之外，本研究团队提出了一种全新的基于开绕组同步电机并网的新能源同步发电机拓扑<sup>[15]</sup>，在前序研究所提出新型并网拓扑的基础上，本文主要研究新能源同步发电机拓扑的小信号建模方法及稳定性问题。首先利用小信号建模方法，建立了新能源同步发电机的宽频阻抗模型，通过 MATLAB/Simulink 仿真对模型进行了扫频验证，验证了所建宽频阻抗模型的正确性。通过分析新能源同步发电机和传统跟网型变流器互联系统的阻抗特性，表明新能源同步发电机的接入可以将跟网型新能源重塑为同步发电机的阻抗特性。建立了某光伏电站的聚合阻抗模型，将部分机组改造为新能源同步发电机，分析表明，改造后的光伏场站，稳定裕度得到了提升，振荡风险降低，证明了新能源同步发电机的场站级阻抗重塑和抑制振荡作用，最后通过仿真验证了上述结论的正确性。

## 1 新能源同步发电机的基本拓扑

新能源同步发电机的拓扑如图 1 所示，其主电路部分主要由直流母线、三相变流器、crowbar 电路、开绕组同步电机和励磁机组组成。本拓扑在硬件电路上和传统并网变流器最大的不同点在于，一台开绕组同步电机替代了常规的无源滤波电路作为并网接口。稳态运行时，采用额定励磁电压，crowbar 电路断开不投入运行，变流器产生三相调制波，电流经过开绕组同步电机的定子绕组后并网。故障期间，投入 crowbar 电路，将变流器部分短接并且加入强励磁，此时新能源同步发电机作调相机运行，起到支撑故障期间电压、提供短路电流的作用。

## 2 新能源同步发电机的序阻抗建模

稳态运行时，新能源同步发电机变流器和开绕组同步电机之间的 crowbar 电路断开，励磁电压恒定，此时的新能源同步发电机采用图 1 所示的下垂控制策略。开绕组电机将绕组的中性点打开，因此具有两侧端子，一侧与三相变流器相接，另一侧与电网相接。基于开绕组同步电机的状态方程，建立开绕组同步电机的小信号表达式，利用变流器端口输出电压将变流器和电机模型联系起来，最后得到新能源同步发电机的序阻抗模型。

### 2.1 变流器部分的序阻抗建模

下垂控制策略如图 1 所示，其中主要包含了功率计算环、有功-频率环、无功-电压环 3 个环节。功率环主要用于计算并网点输出有功功率  $P_e$  和无功功率  $Q_e$ ，有功环路模拟了同步电机的有功-频

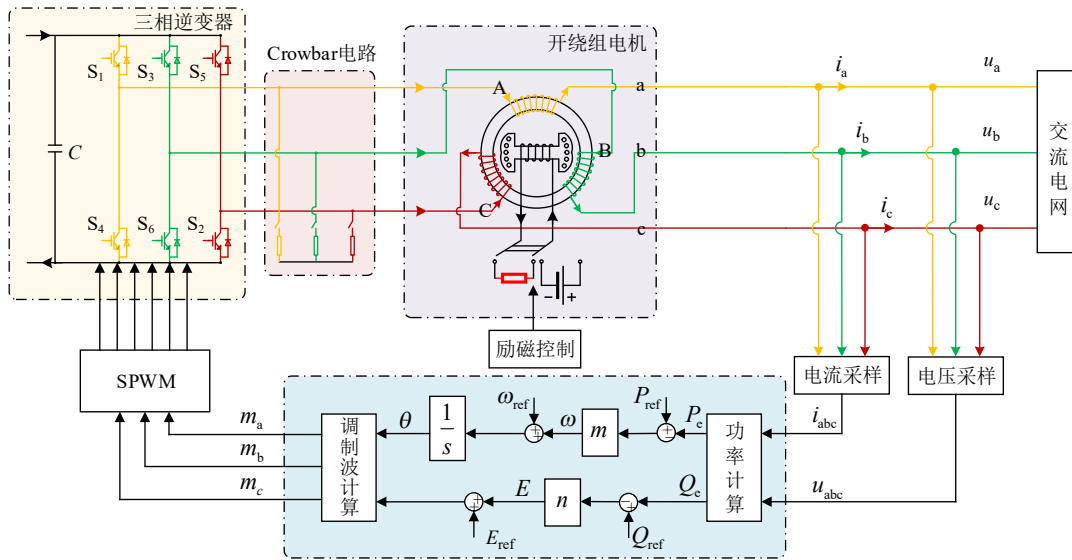


图1 新能源同步发电机主电路拓扑及控制结构

Fig. 1 Main circuit topology and control strategy of renewable energy synchronous generator

率下垂特性，无功环路模拟了无功-电压下垂特性。 $P_{ref}$  为有功功率参考值， $\omega_{ref}$  为频率参考值， $Q_{ref}$  为无功功率参考值， $E_{ref}$  为电压参考值。功率计算环节计算出的并网点有功功率经过有功环计算出频率，经过积分环节得到电压相位  $\theta$ ，无功功率经过无功环得到电压幅值  $E$ 。下垂控制环节生成的电压幅值  $E$  和相角  $\theta$  经过式(1)所示的参考信号生成环节可以得到三相电压的参考波。

$$\begin{cases} m_a = E \cos(\theta) \\ m_b = E \cos(\theta - \frac{2}{3}\pi) \\ m_c = E \cos(\theta + \frac{2}{3}\pi) \end{cases} \quad (1)$$

采用平均值模型时，以 a 相为例，变流器端口的输出电压  $u_a$  表达式如式(2)所示

$$u_a = K_m U_{dc} m_a \quad (2)$$

式中： $K_m$  为调制增益； $U_{dc}$  为直流母线电压。

### 2.1.1 功率计算环节序阻抗建模

以 a 相为例，并网点电压电流统一表示为基波和小扰动的组合：

$$\begin{cases} u_a(t) = U_1 \cos(\omega_1 t) + U_p \cos(2\pi f_p t + \varphi_{vp}) + U_n \cos(2\pi f_n t + \varphi_{vn}) \\ i_a(t) = I_1 \cos(\theta_1 t + \varphi_{i1}) + I_p \cos(2\pi f_p t + \varphi_{ip}) + I_n \cos(2\pi f_n t + \varphi_{in}) \end{cases} \quad (3)$$

式中： $U_1$ 、 $U_p$ 、 $U_n$  依次为基波电压、正序扰动电压和负序扰动电压的幅值； $I_1$ 、 $I_p$ 、 $I_n$  依次为基波电流、正序扰动电流和负序电流幅值； $\varphi_{vp}$ 、 $\varphi_{vn}$  为正序扰动电压和负序扰动电压的相角； $\varphi_{i1}$ 、 $\varphi_{ip}$ 、 $\varphi_{in}$  为基波、正序扰动和负序扰动电流的相角。将式(3)中的电压和电流时域表达式变换到频域得到：

$$\dot{U}_a[f] = \begin{cases} \dot{U}_1, f = \pm f_1 \\ \dot{U}_p, f = \pm f_p \\ \dot{U}_n, f = \pm f_n \end{cases} \quad (4)$$

$$\dot{I}_a[f] = \begin{cases} \dot{I}_1, f = \pm f_1 \\ \dot{I}_p, f = \pm f_p \\ \dot{I}_n, f = \pm f_n \end{cases} \quad (5)$$

式中： $\dot{U}_1$ 、 $\dot{I}_1$  为基波的频域形式， $\dot{U}_1 = U_1/2$ ， $\dot{I}_1 = (I_1/2)e^{\pm j\varphi_{i1}}$ ； $U_1$ 、 $I_1$  为基波电压、电流幅值； $\dot{U}_p$ 、 $\dot{I}_p$  为正序小扰动的频域形式  $\dot{U}_p = (U_p/2)e^{\pm j\varphi_{vp}}$ ， $\dot{I}_p = (I_p/2)e^{\pm j\varphi_{ip}}$ ； $\dot{U}_n$ 、 $\dot{I}_n$  为负序耦合小扰动的频域形式  $\dot{U}_n = (U_n/2)e^{\pm j\varphi_{vn}}$ ， $\dot{I}_n = (I_n/2)e^{\pm j\varphi_{in}}$ 。

根据瞬时功率理论，计及低通滤波器环节的影响后，三相功率可以通过式(6)来表示：

$$\begin{cases} P = G_{LPF}(s)(u_a i_a + u_b i_b + u_c i_c) \\ Q = \frac{G_{LPF}(s)}{\sqrt{3}}(u_b - u_c)i_a + (u_c - u_a)i_b + (u_a - u_b)i_c \end{cases} \quad (6)$$

式中： $u_x(x=a,b,c)$ 、 $i_x(x=a,b,c)$  为并网点处的三相相电压和相电流； $G_{LPF}(s)$  为功率低通滤波器的传递函数。

忽略扰动的高阶分量，根据频域卷积定理，计算出式(6)的频域表达式如式(7)和式(8)所示：

$$P[f] = \begin{cases} 3G_{LPF}(s)(\dot{U}_1^* \dot{I}_1 + \dot{U}_1 \dot{I}_1^*), & \text{直流} \\ 3G_{LPF}(s)(\dot{U}_p^* \dot{I}_p + \dot{U}_p \dot{I}_p^* + \dot{U}_1 \dot{I}_n + \dot{U}_n \dot{I}_1), & \pm(f_p - f_1) \end{cases} \quad (7)$$

$$Q[f] = \begin{cases} 3jG_{LPF}(s)(\dot{U}_1^* \dot{I}_1 - \dot{U}_1 \dot{I}_1^*), & \text{直流} \\ \pm 3jG_{LPF}(s)(\dot{U}_1^* \dot{I}_p - \dot{U}_p \dot{I}_1^* + \dot{U}_n \dot{I}_1 - \dot{U}_1 \dot{I}_n), & \pm(f_p - f_1) \end{cases} \quad (8)$$

观察功率计算式发现, 由于耦合作用, 在功率计算环路中出现了频率为  $f_n=f_p-2f_1$  的负序耦合电压和电流, 具体产生原因为式(1)中的调制环节产生, 将在第 2.1.4 节中具体阐述。

### 2.1.2 功率控制环节序阻抗建模

功率控制环节包含有功-频率环和无功-电压环, 根据图 1 所示的控制结构可知, 有功环和无功环互相解耦, 并且求出输入参数  $P_c$  和  $Q_c$  的频域表达式后, 即可分别求出电压幅值  $E$  和相角  $\theta$  的频域表达式。

根据有功-频率环路的控制框和式(7)所示的有功功率频域表达式  $P[f]$ , 可以写出相角的频域表达式  $\theta[f]$  如式(9)所示:

$$\theta[f] = \begin{cases} \theta_0, & \text{直流} \\ \theta_p = M(s)(\dot{U}_p \dot{I}_1^* + \dot{U}_1^* \dot{I}_p + \dot{U}_1 \dot{I}_n + \dot{U}_n \dot{I}_1), & \pm(f_p - f_1) \end{cases} \quad (9)$$

式中:  $\theta_0$  为相角的直流分量值;  $\theta_p$  为注入扰动后产生的扰动分量值;  $M(s)$  为包含低通滤波器、频率下垂特性和积分环节的有功-频率环传递函数,  $M(s) = -3mG_{LPF}(s)/s$ 。

同理, 根据无功-电压环路的控制框图和式(8)所示的无功功率频域表达式  $Q[f]$ , 写出电压幅值的频域表达式  $E[f]$  如下式所示:

$$E[f] = \begin{cases} E_0, & \text{直流} \\ E_p = \pm N(s)(\dot{U}_1^* \dot{I}_p - \dot{U}_p \dot{I}_1^* + \dot{U}_n \dot{I}_1 - \dot{U}_1 \dot{I}_n), & \pm(f_p - f_1) \end{cases} \quad (10)$$

式中:  $E_0$  为电压的直流分量值;  $E_p$  为注入扰动后产生的扰动分量值;  $N(s)$  为包含电压下垂控制特性和低通滤波器的无功-电压环传递函数;  $N(s) = -3jnG_{LPF}(s)$ 。

### 2.1.3 调制环节序阻抗建模

调制环节根据式(1)所示的公式生成三相调制波, 由式(9)和式(10)可知, 注入扰动后, 电压幅值和相角中, 除了直流分量之外, 还会产生小扰动分量, 将相角写作  $\theta = \theta_0 + \theta_p$  的含有小扰动的形式, 展开后可得:

$$\cos(\theta) = \cos(\theta_0) - \theta_p \sin(\theta_0) \quad (11)$$

式中:  $\theta_0$  为基波角频率, 联立式(9)和式(11), 根据频域卷积定理可以得到  $\cos(\theta)$  的频域表达式如式(12)所示:

$$\cos\theta[f] = \begin{cases} 1/2, & \pm f_1 \\ \pm(j/2)\theta_p, & \pm f_p \\ \mp(j/2)\theta_p, & \pm f_n \end{cases} \quad (12)$$

联立式(1)(10)和(12), 忽略小信号分量之间的

卷积后可得调制波的 a 相频域表达式:

$$m_a[f] = \begin{cases} (1/2)E_0, & \pm f_1 \\ \pm(j/2)\theta_p E_0 + (1/2)E_p, & \pm f_p \\ \mp(j/2)\theta_p E_0 + (1/2)E_p, & \pm f_n \end{cases} \quad (13)$$

由式(13)可知, 变频器的调制波中除了基波分量和频率为  $f_p$  的正序扰动外, 参考信号生成环节还产生了频率为  $f_n$  的负序调制波分量。调制电压经过 OWSM 定子产生频率为  $f_p$  的正序电流  $\dot{I}_p$  和频率为  $f_n$  的负序电流  $\dot{I}_n$ 。上述电流信号又会在下个控制周期被功率计算环节采集, 从而叠加到控制环路中, 综上, 调制波为包含频率耦合项的  $2 \times 2$  矩阵形式。

将式(9)(10)代入式(13)中, 调制波中的小扰动信号可以写作如下形式:

$$m_a[f] = \begin{cases} M_1 \dot{U}_{pp} + M_2 \dot{I}_p + M_3 \dot{U}_{pn} + M_4 \dot{I}_n, & \pm f_p \\ N_1 \dot{U}_{pp} + N_2 \dot{I}_p + N_3 \dot{U}_{pn} + N_4 \dot{I}_n, & \pm f_n \end{cases} \quad (14)$$

式中:  $M, N$  的具体表达式详见附录 A。

### 2.1.4 变频器端口电压序阻抗建模

联立式(2)和式(14)可以写出新能源同步发电机的机侧变频器端口电压和扰动电压、电流之间的关系如式(15)所示:

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_{ip} \\ \dot{U}_{in} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_1 & M_3 \\ N_1 & N_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}_p \\ \dot{U}_n \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} M_2 & M_4 \\ N_2 & N_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_p \\ \dot{I}_n \end{bmatrix} \quad (15)$$

式中:  $\dot{U}_{ip}$  和  $\dot{U}_{in}$  分别为变频器端口电压的正、负序扰动分量。

## 2.2 开绕组同步电机部分的序阻抗建模

### 2.2.1 OWSM 在旋转坐标系下的时域模型

写出开绕组同步电机的电压和磁链方程如式(16)所示:

$$\begin{cases} \mathbf{u}_m = \mathbf{R}_m \mathbf{i}_m + p\boldsymbol{\psi}_m + \boldsymbol{\omega}_m \boldsymbol{\psi}_m \\ \boldsymbol{\psi}_m = \mathbf{L}_m \mathbf{i}_m \end{cases} \quad (16)$$

式中: 算子  $p$  表示时域微分算子;  $\mathbf{u}_m$  为 OWSM 电压向量;  $\mathbf{i}_m$  为 OWSM 电流向量;  $\mathbf{R}_m$  为 OWSM 电阻矩阵;  $\boldsymbol{\psi}_m$  为 OWSM 磁链向量;  $\boldsymbol{\omega}_m$  为同步系数矩阵;  $\mathbf{L}_m$  为电机电感矩阵, 具体表达式详见附录 A。联立式(16)所示的电压和磁链方程, 即可得到  $dq$  坐标系下的 OWSM 状态方程如式(17)所示。

$$\mathbf{u}_m = (\mathbf{R}_m + \boldsymbol{\omega}_m \mathbf{L}_m) \mathbf{i}_m + p\mathbf{L}_m \mathbf{i}_m \quad (17)$$

### 2.2.2 OWSM 的序阻抗模型

为方便推导, 将 2.2.1 节中的 5 阶矩阵写成分块矩阵的形式, 将 5 阶矩阵  $\mathbf{R}_m + \boldsymbol{\omega}_m \mathbf{L}_m$  写成



$\begin{bmatrix} R_1 & R_2 \\ O & R_3 \end{bmatrix}$ , 5阶矩阵  $L_m$  写成  $\begin{bmatrix} L_1 & L_2 \\ L_2^T & L_3 \end{bmatrix}$ 。其中,  $R_1$

为  $2 \times 2$  矩阵,  $R_2$  为  $2 \times 3$  矩阵,  $R_3$  为  $3 \times 3$  矩阵。  $L_1$  为  $2 \times 2$  矩阵,  $L_2$  为  $2 \times 3$  矩阵,  $L_3$  为  $3 \times 3$  矩阵。

利用上述分块矩阵将式(17)改写为如下形式:

$$\begin{cases} \mathbf{u}_{ms} = (\mathbf{R}_1 + p\mathbf{L}_1)\mathbf{i}_{ms} + (\mathbf{R}_2 + p\mathbf{L}_2)\mathbf{i}_{mr} \\ \mathbf{u}_{mr} = (p\mathbf{L}_2^T)\mathbf{i}_{ms} + (\mathbf{R}_3 + p\mathbf{L}_3)\mathbf{i}_{mr} \end{cases} \quad (18)$$

式中:  $\mathbf{u}_{ms} = [v_{sd} \ v_{sq}]^T$ ,  $\mathbf{u}_{mr} = [v_f \ 0 \ 0]^T$ ,  $\mathbf{i}_{ms} = [i_{sd} \ i_{sq}]^T$ ,  $\mathbf{i}_{mr} = [i_f \ i_{sd} \ i_{sq}]^T$ 。

由式(18)可得 OWSM 的定子端口电压电流关系如式(19)所示:

$$\mathbf{u}_{ms} = (\mathbf{R}_1 + \mathbf{L}_1 p - \mathbf{T}\mathbf{L}_2^T p)\mathbf{i}_{ms} + \mathbf{K}\mathbf{u}_{mr} \quad (19)$$

式中:  $\mathbf{K} = (\mathbf{R}_2 + \mathbf{L}_2 p)(\mathbf{R}_3 + \mathbf{L}_3 p)^{-1}$ 。

由于序阻抗是在频域下建立的正负序模型, 因此需要首先建立  $dq$  坐标系的阻抗和序阻抗之间的关系, 以电压为例, 推导  $dq$  坐标系分量和正负序分量之间的关系。通过对称分量变换矩阵  $\mathbf{B}$  可以将 abc 分量转换为正负序分量, 如式(20)所示:

$$\begin{bmatrix} u_p \\ u_n \end{bmatrix} = \mathbf{B} \begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} \quad (20)$$

式中: 对称分量变换矩阵  $\mathbf{B} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix}$ ;  $a = e^{j2\pi/3}$ 。

对于 abc 分量, 可以通过 park 变换矩阵  $\mathbf{T}(\theta_1)$  将 abc 分量转换到  $dq$  坐标系下, 如下式所示:

$$\begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix} = \mathbf{T} \begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} \quad (21)$$

其中 park 变换矩阵为

$$\mathbf{T}(\theta_1) = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\theta_1) & \cos(\theta_1 - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_1 + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin(\theta_1) & -\sin(\theta_1 - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta_1 + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix}$$

式中:  $\theta_1 = \omega_1 t$ ,  $\omega_1$  为同步转速。

联立式(20)(21)可得式(22)所示的  $dq$  轴分量和正负序分量之间的关系:

$$\begin{bmatrix} u_p \\ u_n \end{bmatrix} = \mathbf{B}\mathbf{T}^{-1} \begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix} \quad (22)$$

其中:

$$\mathbf{B}\mathbf{T}^{-1} = \begin{bmatrix} \frac{e^{j\theta_1}}{2} & \frac{je^{j\theta_1}}{2} \\ \frac{e^{-j\theta_1}}{2} & -\frac{je^{-j\theta_1}}{2} \end{bmatrix}$$

利用式(22)中的关系, 可以将旋转坐标系下的电压电流关系转换成 abc 坐标系下的正负序电压电流关系:

$$\begin{bmatrix} u_p \\ u_n \end{bmatrix} = \mathbf{B}\mathbf{T}^{-1}(\mathbf{R}_1 + \mathbf{L}_1 p - \mathbf{T}\mathbf{L}_2^T p)\mathbf{T}\mathbf{B}^{-1} \begin{bmatrix} i_p \\ i_n \end{bmatrix} \quad (23)$$

将式(23)由时域变换到频域, 得到 OWSM 的序阻抗模型如式(24)所示:

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_{po} \\ \dot{U}_{no} \end{bmatrix} = \mathbf{Z}_{OWSM} \begin{bmatrix} \dot{i}_p \\ \dot{i}_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{Z}_{ppo} & \mathbf{Z}_{pno} \\ \mathbf{Z}_{npo} & \mathbf{Z}_{nno} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{i}_p \\ \dot{i}_n \end{bmatrix} \quad (24)$$

式中:  $\dot{U}_{po}$ 、 $\dot{U}_{no}$  为开绕组电机定子电压降的序分量形式;  $\mathbf{Z}_{OWSM} = \mathbf{A}_z^{-1}(\mathbf{R}_1 + \mathbf{L}_1 s - \mathbf{T}\mathbf{L}_2^T s)\mathbf{A}_z$ ,  $\mathbf{A}_z = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ -j & j \end{bmatrix}$ 。

### 2.3 新能源同步发电机的序阻抗建模

由新能源同步发电机的拓扑可知, 新能源同步发电机由 OWSM 和变流器 2 部分构成, 变流器部分的输出电压和电网电压之间的压降作用在 OWSM 的定子上。2.1 和 2.2 节分别对变流器部分和 OWSM 部分进行了序阻抗建模。将式(15)代入到式(24)可得新能源同步发电机的阻抗模型如式(25)所示:

$$\mathbf{Z} = \begin{bmatrix} \mathbf{Z}_{pp} & \mathbf{Z}_{pn} \\ \mathbf{Z}_{np} & \mathbf{Z}_{nn} \end{bmatrix} \quad (25)$$

式中:  $\mathbf{Z}$  为新能源同步发电机的阻抗矩阵, 即

$$\mathbf{Z} = \begin{bmatrix} 1 - M_1 & -M_3 \\ -N_1 & 1 - N_3 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \mathbf{Z}_{ppo} - M_2 & \mathbf{Z}_{pno} - M_4 \\ \mathbf{Z}_{npo} - N_2 & \mathbf{Z}_{nno} - N_4 \end{bmatrix}$$

在 Matlab/Simulink 仿真软件中建立新能源同步发电机的仿真模型, 具体参数详见附录 B。通过扫频验证, 将理论计算结果与仿真扫频结果做对比, 如图 2 所示。图 2 中, 理论阻抗计算结果用实线表示, 其中正、负序阻抗用蓝色线表示, 相应的耦合阻抗使用黄色线表示, 仿真扫频结果用点表示。扫频结果显示, 前文中所建立的序阻抗模型与仿真结果十分吻合, 验证了序阻抗模型的正确性。

## 3 新能源同步发电机的宽频阻抗特性分析

根据第 2 节的阻抗建模过程可知, 新能源同步发电机的阻抗特性受开绕组同步电机自身阻抗特性和控制特性的双重影响。接下来分别研究励磁电压和控制参数对新能源同步发电机阻抗特性的影响, 最后研究了新能源同步发电机的宽频阻抗重塑能力。

### 3.1 励磁系统对阻抗的影响

通过设置不同的励磁电压幅值, 其余参数不变, 分析励磁电压对阻抗特性的影响, 不同励磁电压的阻抗特性如图 3 所示。根据图 3 可知, 改变励磁电压对新能源同步发电机的阻抗特性影响较小,

励磁控制并不是阻抗的主导因素。

### 3.2 控制参数对阻抗的影响

新能源同步发电机的控制采用电压下垂控制，

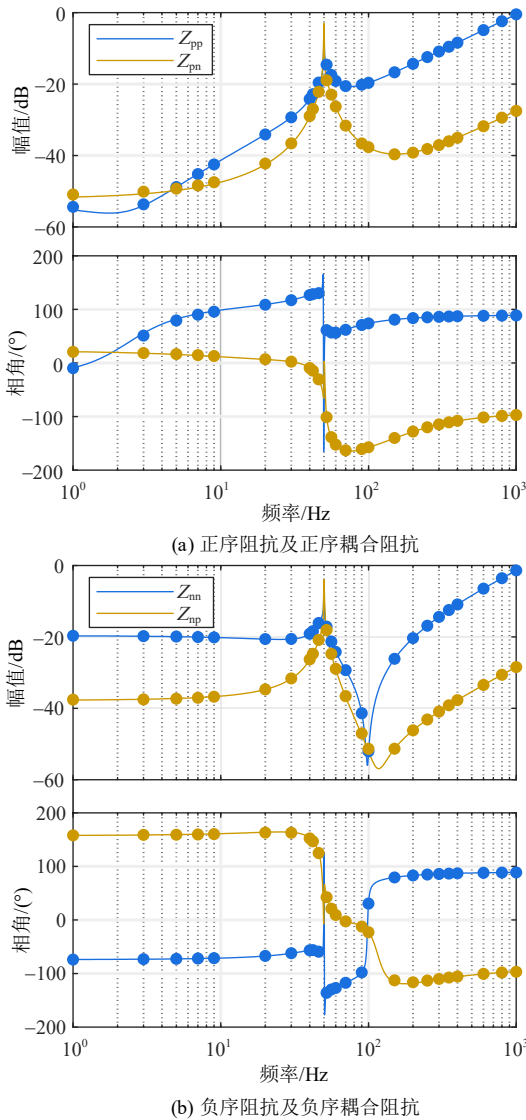


图2 新能源同步发电机阻抗模型计算与仿真结果对比  
Fig. 2 Results comparison of calculation and simulation scanning of RESG impedances

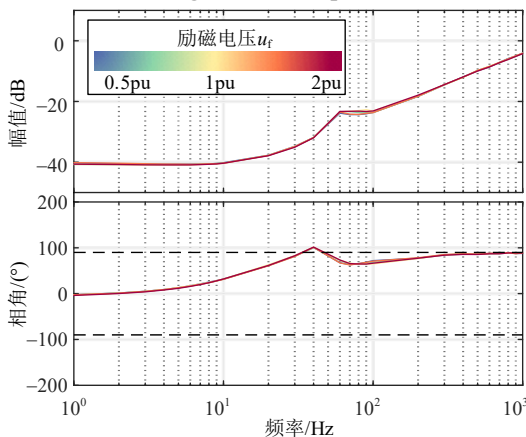


图3 励磁电压对阻抗特性的影响  
Fig. 3 Effect of excitation voltage on impedance characteristics

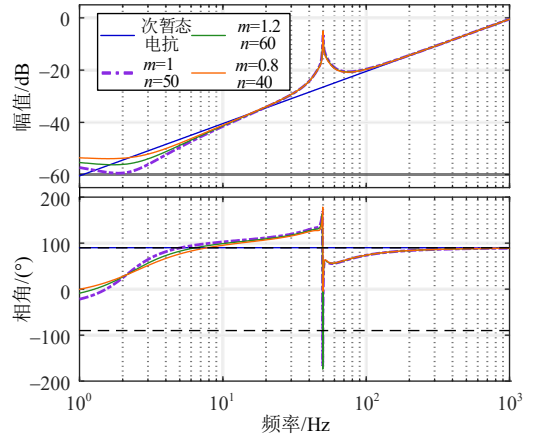


图4 控制参数对阻抗特性的影响  
Fig. 4 Effect of control parameters on impedance characteristics

主要控制参数为有功-频率调节系数  $m$  和无功-电压调节系数  $n$ 。改变上述控制参数的取值，得到宽频阻抗特性如图4所示，其中， $m$  和  $n$  的数量级为  $10^{-5}$ 。根据附录A的开绕组同步电机参数，计算出电机的次暂态电抗(subtransient reactance, STR)并绘制其阻抗曲线，如图4中蓝色曲线所示。

根据图4分析可知，下垂控制参数对新能源同步发电机阻抗特性的影响主要集中在  $1\sim 20\text{Hz}$  的频段，在  $100\text{Hz}$  以上的频段，阻抗曲线和电机次暂态电抗基本重合。由阻抗模型分析结果可知，新能源同步发电机的阻抗特性由开绕组同步发电机主导，下垂控制参数对阻抗特性的影响主要集中在  $20\text{Hz}$  以下的频段。

### 3.3 新能源同步发电机的宽频阻抗重塑能力分析

根据图2所示的阻抗曲线可知，新能源同步发电机的阻抗整体幅值较小，与传统的跟网型变流器相比，不易与电网阻抗交互，产生振荡问题。传统并网变流器通常采用跟网型(grid-following, GFL)控制，从阻抗角度来看，跟网型变流器可以等效为一个理想电流源和阻抗的并联，许多文献已经对跟网型变流器的阻抗特性进行了详细的研究<sup>[16-20]</sup>，在不同的频段，跟网型变流器表现为不同的阻抗特性。在次/超同步频段，跟网型变流器的阻抗特性，表现为容性负阻尼特性，当电网为弱感性电网时，跟网型变流器与电网交互产生振荡的风险较高。

为研究新能源同步发电机对跟网型变流器的阻抗特性重塑作用，建立了如图5所示的新能源同步发电机和某型号跟网型光伏变流器互联运行系统案例，二者并联后经公共并网点接入电网，其中，新能源同步发电机的参数同2.3节，光伏变流器参数详见附录B，比较结果如图6所示。以正序阻抗为例，并网前后的系统阻抗变化如图6所示，其中

绿色曲线为跟网型变流器的阻抗，具体表达式可参考文献[17]，紫色虚线为新能源同步发电机的阻抗，橙色曲线为并联后整个并网系统的阻抗。

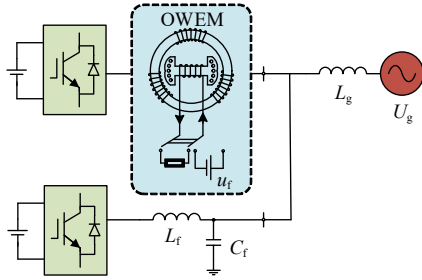


图 5 新能源同步发电机和跟网型变流器并联结构示意图  
Fig. 5 Structure diagram of parallel connection of RESG and GFL converter

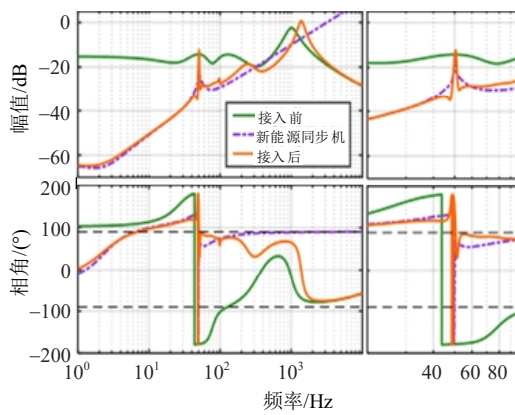


图 6 新能源同步发电机投运前后并网系统的阻抗变化  
Fig. 6 Impedance changes in grid-connected systems before and after commissioning RESG

图 6 中的阻抗分析结果表明，在低频段及次/超同步频段，并联后的系统基本上呈现同步电机的特征。其中，在次/超同步频段附近，并联后的阻抗的相位裕度在  $90^\circ$  附近，与并联运行之前相比，大大降低了振荡的风险。在高频段，由于电机定子阻抗较小，系统的阻抗特性由跟网型变流器的滤波器主导。通过并联新能源同步发电机装置，可以将特定频段的跟网型变流器的阻抗特性重塑为接近同步发电机的特性，有助于降低振荡风险，提升跟网型新能源的送出能力。

## 4 案例分析

构建含新能源同步发电机的光伏电站的电磁暂态仿真模型，分析了接入新能源同步发电机前后的阻抗特性变化，通过时域仿真验证了理论分析的结果，初步验证了新能源同步发电机的应用潜力。

### 4.1 含新能源同步发电机的光伏场站建模

新能源同步发电机不仅可以用于改善单个并网变流器的阻抗特性，还可以替换场站中的变流器，改善场站整体的稳定性。为研究新能源同步发电机接入场站对光伏场站稳定性的影响，在

MATLAB/Simulink 中建立了光伏场站的电磁暂态仿真模型，包含光伏变流器、汇集线路、变压器等元素。场站内部包含 3 条汇集线路，每条汇集线路上接入 10 台 500kVA 光伏变流器(参数同 2.4 节)，单台变流器经过箱式变压器接入 35kV 中压电网，最后整个场站经过主变压器接入 110kV 高压电网，光伏场站的参数详见附录 B。将汇集线路内的最后一台跟网型变流器改造为 500kVA 的新能源同步发电机，含新能源同步发电机的光伏场站结构如图 7 所示。

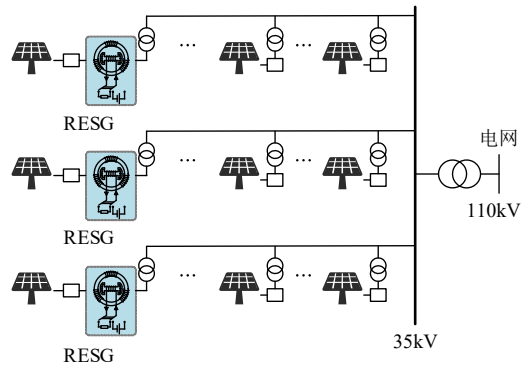


图 7 新能源同步发电机接入光伏场站结构示意图  
Fig. 7 Structure diagram of the RESGs interconnection with photovoltaic farm

### 4.2 光伏场站振荡抑制案例频域分析

对于新能源场站的聚合阻抗建模方法，文献[21-22]已经做了详细推导，文献[23]所提出的广义奈奎斯特判据 (generalized Nyquist criterion, GNC)  $L=Y_g^{-1}Y_{Farm}$ ，可以用于分析新能源并网系统的稳定性，广义奈奎斯特曲线为 2 个特征根的轨迹，表现为一对曲线。

若不对场站进行任何改造，光伏场站内全部采用跟网型变流器，当短路比为 1.85 时，并网系统的奈奎斯特曲线为图 8 中的红色曲线，观察可知，2 条根轨迹分别在 24Hz 和 76Hz 处绕过了  $(-1,0)$  点，此时系统稳定裕度不足，有发生次/超同步振荡的风

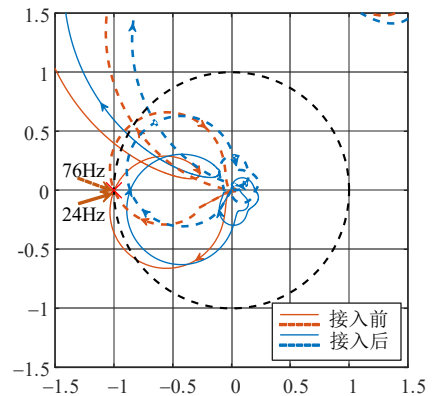


图 8 投运新能源同步发电机前后光伏电站奈奎斯特曲线  
Fig. 8 Nyquist curves of the photovoltaic farm before and after the commissioning of RESGs



险。在第 2s 时，投入新能源同步发电机，光伏场站的根轨迹如图 8 中蓝色奈奎斯特曲线所示。对比投入新能源同步发电机前后的奈奎斯特曲线可知，投入新能源同步发电机后，系统不再绕过(-1,0)点，理论分析结果表明，接入新能源同步发电机后，光伏场站的稳定裕度得到提升，振荡风险降低。

### 4.3 光伏场站振荡抑制案例时域仿真

建立光伏场站的电磁暂态模型，2s 前场站内全部为跟网型变流器，2s 后投入新能源同步发电机。图 9 为新能源同步发电机接入前后的光伏电站并网点电流波形。图 10 为接入新能源同步发电机前后，光伏电站并网点电流的 FFT 分析结果，根据并网点电流波形及 FFT 分析结果可知，2s 时投入新能源同步发电机后，光伏电站并网电流中的振荡得到抑制，验证了理论分析结果的正确性。

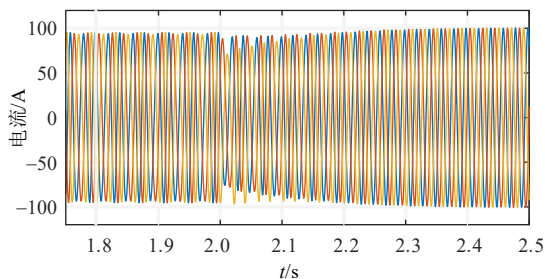


图 9 光伏电站并网点三相电流波形

Fig. 9 Current waveform of the photovoltaic farm

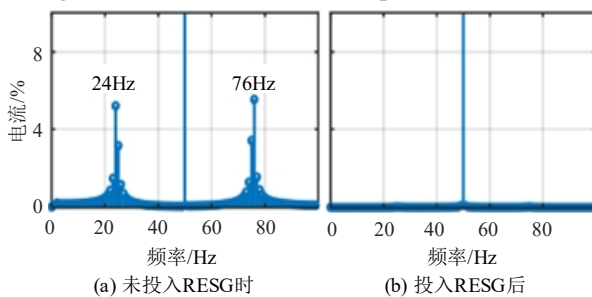


图 10 光伏电站并网点电流 FFT 分析

Fig. 10 FFT analysis of the photovoltaic farm current

上述理论计算及时域仿真结果表明，在新能源场站中接入一定容量的新能源同步发电机，可以起到提升弱电网下新能源场站稳定性，抑制次/超同步振荡的作用。

## 5 结论

本文基于新能源同步发电机拓扑，建立了新能源同步发电机宽频阻抗模型，并通过扫频仿真验证了所建立模型的正确性。研究了新能源同步发电机对传统跟网型变流器的阻抗重塑作用，建立了含新能源同步发电机的新能源场模型并分析了新能源同步发电机对次/超同步振荡的抑制作用。初步证实了新能源同步发电机在振荡抑制方面的应用潜力，

为后续研究控制策略、布点优化及容量配置等问题奠定了基础。

附录见本刊网络版 (<http://www.dwjs.com.cn/CN/1000-3673/current.shtml>)。

## 参考文献

- [1] WANG Weisheng, LI Guanghui, GUO Jianbo. Large-scale renewable energy transmission by HVDC: challenges and proposals[J]. Engineering, 2022, 19: 252-267.
- [2] 衣立东, 马宁宁, 丁茂生, 等. 新型电力系统宽频振荡防控体系架构[J]. 电网技术, 2023, 47(10): 4092-4101.  
YI Lidong, MA Ningning, DING Maosheng, et al. Framework of prevention and control system for wide-band oscillations in new type power systems[J]. Power System Technology, 2023, 47(10): 4092-4101(in Chinese).
- [3] 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.  
ZHANG Chong, WANG Weisheng, HE Guoqing, 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(in Chinese).
- [4] 李光辉, 王伟胜, 刘纯, 等. 直驱风电场接入弱电网宽频带振荡机理与抑制方法(一): 宽频带阻抗特性与振荡机理分析[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(22): 6547-6561.  
LI Guanghui, WANG Weisheng, LIU Chun, et al. Mechanism analysis and suppression method of wideband oscillation of PMSG wind farms connected to weak grid(Part I): analysis of wideband impedance characteristics and oscillation mechanism[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(22): 6547-6561(in Chinese).
- [5] 李光辉, 王伟胜, 刘纯, 等. 直驱风电场接入弱电网宽频带振荡机理与抑制方法(二): 基于阻抗重塑的宽频带振荡抑制方法[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(23): 6908-6920.  
LI Guanghui, WANG Weisheng, LIU Chun, et al. Mechanism analysis and suppression method of wideband oscillation of PMSG wind farms connected to weak grid(Part II): suppression method of wideband oscillation based on impedance reshaping[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(23): 6908-6920(in Chinese).
- [6] 李光辉, 王伟胜, 张兴, 等. 双馈风电场并网次/超同步振荡建模与机理分析(一): 考虑功率外环的阻抗建模[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(7): 2438-2448.  
LI Guanghui, WANG Weisheng, ZHANG Xing, et al. Modeling and suppression method of sub/super-synchronous oscillation of grid-connected DFIG wind farms (Part I): sequence impedance modeling and analysis of DFIG wind turbines considering power loop [J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(7): 2438-2448(in Chinese).
- [7] 李光辉, 王伟胜, 张兴, 等. 双馈风电场并网次/超同步振荡建模与机理分析(二): 阻抗特性与振荡机理分析[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(10): 3614-3626.  
LI Guanghui, WANG Weisheng, ZHANG Xing, et al. Modeling and mechanism analysis of sub/super-synchronous oscillation of grid-connected DFIG wind farms (Part II): analysis of impedance characteristic and oscillation mechanism[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(10): 3614-3626(in Chinese).
- [8] 李光辉, 王伟胜, 郭剑波, 等. 风电场经 MMC-HVDC 送出系统宽频带振荡机理与分析方法[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(18): 5281-5297.



- LI Guanghui, WANG Weisheng, GUO Jianbo, et al. Broadband oscillation mechanism and analysis for wind farm integration through MMC-HVDC system[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(18): 5281-5297(in Chinese).
- [9] 许诒翊, 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): 3586-3594.
- 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): 3586-3594(in Chinese).
- [10] ZHONG Qingchang, WEISS G. Synchronverters: inverters that mimic synchronous generators[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58(4): 1259-1267.
- [11] LASSETER R H, CHEN Zhe, PATTABIRAMAN D. Grid-forming inverters: a critical asset for the power grid[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2020, 8(2): 925-935(in Chinese).
- [12] 金一丁, 于钊, 李明节, 等. 新一代调相机与电力电子无功补偿装置在特高压交直流电网中应用的比较[J]. 电网技术, 2018, 42(7): 2095-2102.
- JIN Yiding, YU Zhao, LI Mingjie, et al. Comparison of new generation synchronous condenser and power electronic reactive-power compensation devices in application in UHV DC/AC grid[J]. Power System Technology, 2018, 42(7): 2095-2102(in Chinese).
- [13] 王康, 李子恒, 杨超然, 等. 面向大型新能源基地小干扰稳定性提升的调相机选址方法[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(4): 66-74.
- WANG Kang, LI Ziheng, YANG Chaoran, et al. Siting method of synchronous condenser for small-signal stability improvement of large-scale renewable energy base[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(4): 66-74(in Chinese).
- [14] 沈广进, 辛焕海, 刘昕宇, 等. 大型新能源基地中调相机同步失稳机理与影响因素分析[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(20): 100-108.
- SHEN Guangjin, XIN Huanhai, LIU Xinyu, et al. Analysis on synchronization instability mechanism and influence factors for condenser in large-scale renewable energy base[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(20): 100-108(in Chinese).
- [15] 刘纯, 李光辉, 何国庆, 等. 一种同步电机化的电力电子并网装置及其控制方法: CN113659629B[P]. 2022-03-08.
- [16] CESPEDES M, SUN Jian. Impedance modeling and analysis of grid-connected voltage-source converters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(3): 1254-1261.
- [17] 侯川川, 朱森, 刘纯, 等. 并网逆变器的谐波放大机制与应用[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(17): 6398-6409.
- HOU Chuanchuan, ZHU Miao, LIU Chun, et al. Harmonic amplification mechanism and application of grid-tied VSI[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(17): 6398-6409(in Chinese).
- [18] 陈新, 王赟程, 龚春英, 等. 采用阻抗分析方法的并网逆变器稳定性研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(7): 2082-2094.
- CHEN Xin, WANG Yuncheng, GONG Chunying, et al. Overview of stability research for grid-connected inverters based on impedance analysis method[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(7): 2082-2094(in Chinese).
- [19] 王赟程, 陈新, 陈杰, 等. 基于谐波线性化的三相 LCL 型并网逆变器正负序阻抗建模分析[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(21): 5890-5898.
- WANG Yuncheng, CHEN Xin, CHEN Jie, et al. Analysis of positive-sequence and negative-sequence impedance modeling of three-phase LCL-type grid-connected inverters based on harmonic linearization[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(21): 5890-5898(in Chinese).
- [20] 刘朋印, 谢小荣, 李原, 等. 构网型控制改善跟网型变流器次/超同步振荡稳定性的机理和特性分析[J]. 电网技术, 2024, 48(3): 990-997.
- LIU Pengyin, XIE Xiaorong, LI Yuan, et al. Mechanism and characteristics of grid-forming control for improving sub/super synchronous oscillation stability of grid-following-based grid-connected converter[J]. Power System Technology, 2024, 48(3): 990-997(in Chinese).
- [21] 汪海蛟, 何国庆, 刘纯, 等. 计及频率耦合和汇集网络的风电场序阻抗模型等值方法[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(15): 87-92.
- WANG Haijiao, HE Guoqing, LIU Chun, et al. Equivalent method for sequence impedance model of wind farms considering frequency coupling and collecting network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(15): 87-92(in Chinese).
- [22] WANG Haijiao, VIETO I, SUN Jian. A method to aggregate turbine and network impedances for wind farm system resonance analysis [C]//Proceedings of the 2018 IEEE 19th Workshop on Control and Modeling for Power Electronics. Padua: IEEE, 2018: 1-8.
- [23] KAZEM BAKHSHIZADEH M, WANG Xiongfei, BLAABJERG F, et al. Couplings in phase domain impedance modeling of grid-connected converters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(10): 6792-6796.



刘纯

在线出版日期: 2024-02-04。

收稿日期: 2024-01-06。

作者简介:

刘纯(1968), 通信作者, 男, 教授级高级工程师, 研究方向为新能源并网运行控制技术, E-mail: liuchun@epri.sgcc.com.cn;

赵牧驰(2000), 男, 硕士研究生, 研究方向为新能源并网系统建模与稳定性分析, E-mail: zhaomuchi@163.com。

汪海蛟(1988), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向为新能源并网系统建模与稳定性分析, E-mail: wanghaijiao@epri.sgcc.com.cn。

(责任编辑 马晓华)

## 附录 A

$$\begin{cases} M_1 = [\frac{j}{2}M(s')E_0\dot{I}_1^* - \frac{N(s')}{2}\dot{I}_1^*]e^{j\phi_{vir}} \\ M_2 = [\frac{j}{2}M(s')E_0\dot{U}_1^* + \frac{N(s')}{2}\dot{U}_1^*]e^{j\phi_{vir}} \\ M_3 = [\frac{j}{2}M(s')E_0\dot{I}_1 + \frac{N(s')}{2}\dot{I}_1]e^{j\phi_{vir}} \\ M_4 = [\frac{j}{2}M(s')E_0\dot{U}_1 - \frac{N(s')}{2}\dot{U}_1]e^{j\phi_{vir}} \end{cases} \quad (A1)$$

$$\begin{cases} N_1 = [-\frac{j}{2}M(s')E_0\dot{I}_1^* - \frac{N(s')}{2}\dot{I}_1^*]e^{-j\phi_{vir}} \\ N_2 = [-\frac{j}{2}M(s')E_0\dot{U}_1^* + \frac{N(s')}{2}\dot{U}_1^*]e^{-j\phi_{vir}} \\ N_3 = [-\frac{j}{2}M(s')E_0\dot{I}_1 + \frac{N(s')}{2}\dot{I}_1]e^{-j\phi_{vir}} \\ N_4 = [-\frac{j}{2}M(s')E_0\dot{U}_1 - \frac{N(s')}{2}\dot{U}_1]e^{-j\phi_{vir}} \end{cases} \quad (A2)$$

其中,  $s' = s - j\omega_1$ ,  $\phi_{vir}$  为变流器的功角。

$$\begin{cases} \mathbf{u}_m = [u_{sd} \ u_{sq} \ u_f \ 0 \ 0]^T \\ \mathbf{i}_m = [i_{sd} \ i_{sq} \ i_f \ i_{rd} \ i_{rq}]^T \\ \boldsymbol{\psi}_m = [\psi_{sd} \ \psi_{sq} \ \psi_f \ \psi_{rd} \ \psi_{rq}]^T \\ \mathbf{R}_m = \text{diag}\{R_s \ R_s \ R_f \ R_{rd} \ R_{rq}\} \end{cases} \quad (A3)$$

$\boldsymbol{\omega}_m$  为  $5 \times 5$  矩阵, 其中  $\boldsymbol{\omega}_m(1,2) = -\omega$ ,  $\boldsymbol{\omega}_m(2,1) = \omega$ , 其余元素均为 0。

$$\mathbf{L}_m = \begin{bmatrix} L_{sd} & 0 & L_{md} & L_{md} & 0 \\ 0 & L_{sq} & 0 & 0 & L_{mq} \\ L_{md} & 0 & L_f & L_{md} & 0 \\ L_{md} & 0 & L_{md} & L_{rd} & 0 \\ 0 & L_{mq} & 0 & 0 & L_{rq} \end{bmatrix} \quad (A4)$$

上述矩阵中具体参数解释如下(下标  $s$  表示定子量, 下标  $f$  表示励磁绕组, 下标  $r$  表示转子量):  $\psi_{sd}$ ,  $\psi_{sq}$ , 表示定子的  $dq$  轴磁链;  $u_{sd}$ ,  $u_{sq}$  表示定子  $dq$  轴电压分量;  $u_f$  表示励磁电压;  $i_{sd}$ ,  $i_{sq}$  表示定子  $dq$  轴电流分量;  $\psi_f$ ,  $i_f$  表示励磁绕组磁链和电流;  $\psi_{rd}$ ,  $\psi_{rq}$  表示转子  $dq$  轴绕组磁链;  $i_{rd}$ ,  $i_{rq}$  表示转子  $dq$  轴绕组电流;  $R_s$  表示定子  $dq$  轴的电阻值;  $R_f$  表示励磁绕组的电阻值;  $R_{rd}$ ,  $R_{rq}$  表示转子  $dq$  轴的电阻值;  $L_{md}$ ,  $L_{mq}$  表示  $dq$  轴绕组之间的互感;  $L_{sd}$ ,  $L_{sq}$  表示定子绕组  $dq$  轴电感值,  $L_{ls}$  表示定子漏感,  $L_{sd} = L_{md} + L_{ls}$ ,  $L_{sq} = L_{mq} + L_{ls}$ ;  $L_{rd}$ ,  $L_{rq}$

表示转子绕组  $dq$  轴电感值,  $L_{rd}$ ,  $L_{rq}$  表示转子漏感,  $L_{rd} = L_{md} + L_{lr}$ ,  $L_{rq} = L_{mq} + L_{lr}$ ;  $L_f$  表示励磁绕组的电感值,  $L_{lf}$  表示励磁绕组漏感,  $L_f = L_{md} + L_{lf}$ ; 上述变量的取值详见附表 A1。

表 A1 新能源同步发电机的参数

参数	数值	参数	数值
$m$	$1 \times 10^{-5}$	$R_s, L_{ls}$	$4 \times 10^{-3}, 8.7 \times 10^{-5}$
$n$	$5 \times 10^{-4}$	$L_{md}, L_{mq}$	$1.21 \times 10^{-3}, 6.16 \times 10^{-5}$
$P_{set}/\text{kW}$	200	$R_f, L_{lf}$	$0.95 \times 10^{-3}, 1.31 \times 10^{-4}$
$Q_{set}/\text{kvar}$	0	$R_{rd}, R_{rq}$	$2.7 \times 10^{-2}, 2.12 \times 10^{-2}$
$U_b/\text{V}$	311	$L_{rd}, L_{rq}$	$1.12 \times 10^{-4}, 7.98 \times 10^{-5}$
$S_b/\text{kVA}$	500		

## 附录 B

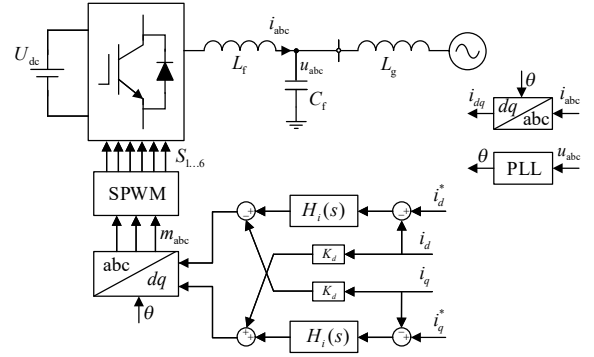


图 B1 跟网型变流器主电路及控制框图

Fig. B1 Main circuit topology and control strategy of grid-following converter

表 B2 跟网型变流器的参数

参数	含义	数值
$U_N$	额定线电压	261V
$S_N$	额定容量	500kVA
$L_f$	交流滤波电感	0.11mH
$C_f$	交流滤波电容	2mF
$U_{dc}$	直流母线电压	750V
$k_{p\_pll}(k_{i\_pll})$	锁相环比例(积分)系数	0.254(103.8)
$k_{p\_hi}(k_{i\_hi})$	电流环比例(积分)系数	0.346(1085.7)

表 B3 新能源光伏场站的参数

元件名称	参数	含义	数值
0.32/35kV	$R_T$	短路电压百分比	5%
升压变	$X_T$	电路损耗	1.5kW
35/110kV	$R_T$	短路电压百分比	10%
升压变	$X_T$	电路损耗	300kW
35kV 汇集	$R_L$	电阻	0.132Ω/km
线路	$X_L$	电抗	0.28Ω/km