

# 多类型无功控制下VSG的有功响应特性分析与功率耦合强度量化

王 杨, 廖 鹏, 杨孟凌, 肖先勇, 王海风  
(四川大学电气工程学院, 四川 成都 610065)

**摘 要:**为应对跟网型新能源机组接入导致的电网支撑能力下降问题,虚拟同步发电机(VSG)技术受到广泛关注,并已在新型电力系统中得到应用。然而,与传统同步发电机不同,VSG在中低压电网运行时,高阻感比线路极易引发复杂的功率耦合现象。基于此,综合伯德图分析与相对增益理论,提出一种新型的VSG功率耦合分析框架。与现有定性分析方法不同,该方法利用伯德图的动态与稳态分析能力以及相对增益理论对耦合强度的量化能力,系统评估了比例无功控制、惯量无功控制及比例积分无功控制对VSG功率耦合强度及其有功响应特性的影响,明确了关键控制参数对耦合的作用机制,并为无功控制环的选取提供了建议。

**关键词:**虚拟同步发电机;功率耦合;功率振荡;相对增益理论;频域分析

中图分类号:TM712 文献标志码:A DOI:10.20204/j.sp.2025.10009

## Analysis of Active Power Response Characteristics and Quantification of Power Coupling Strength in VSG under Multiple Types of Reactive Power Control

WANG Yang, LIAO Peng, YANG Mengling, XIAO Xianyong, WANG Haifeng  
(College of Electrical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

**Abstract:** In response to the decline in grid support capability caused by the integration of grid-following renewable energy units, virtual synchronous generator (VSG) technology has garnered significant attention and has been widely applied in new power systems. However, unlike conventional synchronous generators, when a VSG operates in medium- and low-voltage grids, the lines with high resistance-inductance ratios can easily lead to complex power coupling phenomena. Therefore, this paper proposes a novel analysis framework for VSG power coupling by integrating Bode diagram analysis and relative gain theory. Differing from existing qualitative analysis methods, this approach utilizes the dynamic and steady-state analysis capabilities of Bode diagrams and the coupling strength quantification ability of relative gain theory to systematically evaluate the impact of proportional reactive power control, inertia-based reactive power control, and proportional-integral reactive power control on the VSG's power coupling strength and its active power response characteristics. It identifies the key control parameters influencing coupling and provides recommendations for the selection of reactive power control loops.

**Key words:** VSG; power coupling; power oscillation; relative gain theory; frequency-domain analysis

## 0 引言

目前实际工程中,新能源机组主要采用跟网型变流器(Grid-following Converter, GFL)并网,本质上控制设置为电流源,不参与电压、频率调节,其大规

模接入必然导致电网强度下降,出现低惯量、弱阻尼引发的安全稳定问题凸显。而构网型变流器(Grid-forming Converter, GFM)具有同步电压源特性,可有效提升电压、频率支撑能力,增强电网稳定性。对此,有学者提出了下垂控制<sup>[1]</sup>、虚拟同步发电机(Virtual Synchronous Generator, VSG)控制<sup>[2-3]</sup>、功率同步控制<sup>[4]</sup>、匹配控制<sup>[5]</sup>和虚拟振荡器控制<sup>[6]</sup>等GFM控制。在这些控制中,VSG控制模拟了同步发电机(Synchronous Generator, SG)的转子摇摆方程,是应

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52177104)

Project Supported by the National Natural Science Foundation of China (52177104)

用前景最广的 GFM 控制之一,也是本文关注的焦点。虽然 VSG 模拟了 SG 的摇摆方程,但由于二者在物理本质与运行场景上的差异,导致二者功率耦合特性存在显著区别。SG 通常运行在高压电网,且有较大的同步电抗,因此其功率耦合主要由快速励磁调节装置引起<sup>[7]</sup>。而 VSG 受变流器耐压限制,通常运行在线路阻感比较大的中低压电网。同时, VSG 不像 SG 在参数选择方面存在物理限制,无功控制策略也更为多样,因此功率耦合较 SG 更为复杂。功率耦合在稳态下会影响功率控制精度<sup>[8]</sup>,在动态过程中还会导致 VSG 有功环和无功环振荡分量相互传递,阻碍功率调节过程。因此,研究 VSG 的功率耦合特性是其大规模应用的重要前提。

目前,国内外学者对 VSG 的功率耦合问题已开展了较为广泛的研究。在稳态耦合方面,文献[9]分析了 VSG 小信号模型中非对角线元素的特征,得出耦合程度与功角  $\delta$  有关的结论,并且不同的阻感比会影响  $P-\omega/Q-V$  的控制配对关系。文献[10]指出随着功角增大,功角对无功的影响以及电压对有功的影响均逐渐增强。文献[11]也表明当线路电阻不可忽略时,有功功率和无功功率会同时受电压幅值与功角影响。

另一方面,动态耦合同样对有功功率控制性能有着较大影响<sup>[12]</sup>,因为耦合通道的存在会阻碍功率响应过程<sup>[13]</sup>。文献[14]将无功耦合分解为同步转矩和阻尼转矩,以此来分析耦合对 VSG 有功动态稳定性的影响。文献[15]通过建立 VSG 的状态空间模型,根据特征根的变化分析了耦合对 VSG 功率振荡的影响。文献[16]将无功耦合的影响等效到 VSG 的  $P/\omega$  导纳模型中,从等效电路的角度分析了耦合对 VSG 功率振荡的影响。然而,现有研究仅能对功率耦合的影响给予定性解释,而难以直接建立耦合强度与功率响应特性的关系,导致分析结果无法为控制设计提供有效指导。例如,当功率响应较差时,应对耦合程度进行量化,若耦合程度超过阈值则应优先从解耦策略实现动态响应的优化,而现有方法无法实现上述目标。

本文提出了一种基于伯德图分析与相对增益理论的功率耦合分析框架。该方法先通过伯德图识别有功-无功交互频率,再利用相对增益矩阵(Relative Gain Array, RGA)定量评估耦合程度,从而建立耦合强度与功率动态特性的对应关系。借助所提方法,本文系统性地对比了比例无功控制<sup>[17]</sup>、惯量无功控制<sup>[18]</sup>、比例积分无功控制<sup>[19]</sup>对 VSG 功率耦合特性的影响,明确了关键控制参数的影响趋势并

给出了无功控制的选择建议。最后通过 MATLAB/Simulink 对本文分析结果进行了验证。

## 1 系统描述与功率环建模

### 1.1 系统描述

图 1 为 VSG 并网的拓扑结构与控制框图。 $P, Q, E$  分别为 VSG 的有功功率、无功功率及电压幅值,  $P_0, Q_0, E_0$  分别为有功功率、无功功率及电压幅值的参考值。 $\theta_{vsg}$  为输出电压相角,  $L_f$  与  $R_f$  分别为滤波电感与电阻,  $C_f$  为滤波电容,  $V_{dc}$  为逆变器直流母线电压,  $L_g$  与  $R_g$  分别为输电线路电感与电阻,  $J$  为虚拟惯量,  $D$  为有功下垂系数;  $G_{QE}$  为无功控制的传递函数,  $\omega$  为角频率,  $\omega_0$  为角频率参考值,  $\Delta\omega$  为 VSG 输出频率偏差,  $G_{QE}$  为无功控制的传递函数。 $i_f$  与  $e_o$  分别为变流器端口电流和端口电压, PWM 为逆变器的脉冲宽度调制(Pulse Width Modulation, PWM), Grid 为电网。

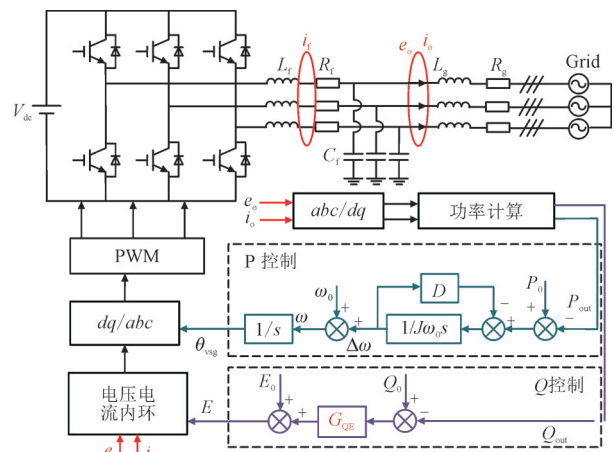


图 1 基于不同无功控制策略的 VSG 的并网拓扑结构  
Fig.1 Grid-connected topology of VSG based on different reactive power control strategies

图 2 对比了当前 VSG 采用的 3 种主流无功控制策略。其中,  $D_q$  为无功阻尼系数,  $J_q$  为无功惯量系数,  $K_{qp}$  为比例系数,  $K_{qi}$  为积分系数。

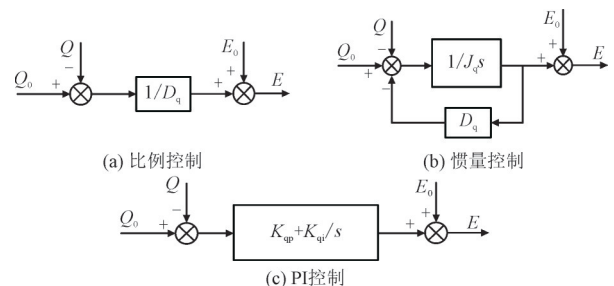


图 2 不同的无功-电压下垂控制策略  
Fig.2 Different reactive power-voltage droop control strategies

图 2(a)所示的无功比例控制因结构简单、易于实现,在实际设备中应用广泛<sup>[20]</sup>;图 2(b)的无功惯量控制可有效抑制电网电压扰动时的快速跌落,为电压保护控制提供缓冲时间<sup>[21]</sup>;图 2(c)的无功 PI 控制则能实现无功功率的无差调节,确保系统在合理的功率因数范围内<sup>[22]</sup>。本文重点分析这 3 种控制策略,其他控制环可遵循相同的步骤进行分析。

### 1.2 VSG 功率环的小信号模型

考虑线路电阻时,图 1 中所示 VSG 的输出功率表达式如下:

$$P = \frac{3}{2} \frac{R_g(E^2 - V_g E \cos \delta) + X_g E V_g \sin \delta}{R_g^2 + X_g^2} \quad (1)$$

$$Q = \frac{3}{2} \frac{X_g(E^2 - V_g E \cos \delta) - R_g E V_g \sin \delta}{R_g^2 + X_g^2} \quad (2)$$

式中: $\delta$ 为功角,即 VSG 输出电压相角  $\theta_{vsg}$  和电网电压相角  $\theta_g$  之差, $\delta = \theta_{vsg} - \theta_g$ ;  $E$  为 VSG 输出电压幅值;  $V_g$  为电网电压幅值;  $X_g$  为输电线路阻抗,  $X_g = \omega L_g$ 。

根据式(1)一式(2),可得输出有功、无功关于输出电压和功角的小信号线性化模型为:

$$\Delta P = H_{p\delta} \Delta \delta + H_{pE} \Delta E \quad (3)$$

$$\Delta Q = H_{qE} \Delta E + H_{q\delta} \Delta \delta \quad (4)$$

式中: $\Delta P, \Delta Q$ 分别为有功功率与无功功率的小信号输出量;  $\Delta \delta, \Delta E$ 分别为功角与电压的扰动输入量;  $H_{p\delta}, H_{pE}, H_{q\delta}, H_{qE}$ 分别为  $\delta$  和  $E$  到  $P$  和  $Q$  的同步系数。

$$H_{p\delta} = \frac{3}{2} \left( \frac{R_g V_{g0} E_0 \sin \delta_0 + \omega_0 L_g E_0 V_{g0} \cos \delta_0}{R_g^2 + (\omega_0 L_g)^2} \right) \quad (5)$$

$$H_{pE} = \frac{3}{2} \left( \frac{R_g(2E_0 - V_{g0} \cos \delta_0) + \omega_0 L_g V_{g0} \sin \delta_0}{R_g^2 + (\omega_0 L_g)^2} \right) \quad (6)$$

$$H_{qE} = \frac{3}{2} \left( \frac{\omega_0 L_g(2E_0 - V_{g0} \cos \delta_0) - R_g V_{g0} \sin \delta_0}{R_g^2 + (\omega_0 L_g)^2} \right) \quad (7)$$

$$H_{q\delta} = \frac{3}{2} \left( \frac{\omega_0 L_g V_{g0} E_0 \sin \delta_0 - R_g E_0 V_{g0} \cos \delta_0}{R_g^2 + (\omega_0 L_g)^2} \right) \quad (8)$$

式(3)一式(4)表明,有功功率和无功功率均为功角与电压的函数,揭示了有功环与无功环之间存在耦合关系。这种功率耦合会导致有功一无功交互作用,从而影响 VSG 的动态性能,严重时可能诱发系统失稳<sup>[23]</sup>。

结合式(3)一式(4),可以得到 VSG 功率环的小

信号模型,如图 3 所示,其中  $\Delta P_0, \Delta Q_0$  分别为有功功率与无功功率的扰动输入量,  $\Delta \omega_{pcc}$  为并网点频率扰动输入量。由于线路电感仅影响大于千赫兹的动态过程,而功率耦合主要集中在 100 Hz 以下的中低频段<sup>[23-24]</sup>,因此在分析功率耦合的过程中可以忽略线路电感的动态,即式(5)一式(8)在分析过程中均可当作常数。

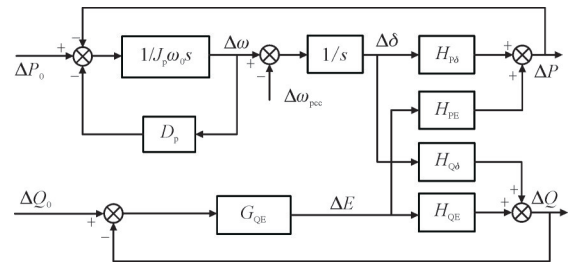


图3 VSG 功率环的小信号模型  
Fig.3 Small-signal model of VSG power control loop

基于图 3 中的 2 输入 2 输出功率环模型,建立从  $\Delta P_0, \Delta Q_0$  到  $\Delta P, \Delta Q$  的传递函数矩阵,如式(9)一式(12)所示。

$$G_{PP} = \frac{\Delta P}{\Delta P_0} = \frac{H_{p\delta} \cdot (1 + G_{QE} \cdot H_{QE}) - G_2}{G_1 \cdot (1 + G_{QE} \cdot H_{QE}) - G_2} \quad (9)$$

$$G_{PQ} = \frac{\Delta Q}{\Delta P_0} = \frac{H_{q\delta}}{G_1 \cdot (1 + G_{QE} \cdot H_{QE}) - G_2} \quad (10)$$

$$G_{QP} = \frac{\Delta P}{\Delta Q_0} = \frac{G_{QE} \cdot H_{pE} \cdot (J_p \omega_0 s^2 + D_p s)}{G_1 \cdot (1 + G_{QE} \cdot H_{QE}) - G_2} \quad (11)$$

$$G_{QQ} = \frac{\Delta Q}{\Delta Q_0} = \frac{G_{QE} \cdot H_{qE} \cdot G_1 - G_2}{G_1 \cdot (1 + G_{QE} \cdot H_{QE}) - G_2} \quad (12)$$

式中: $G_{PP}, G_{PQ}, G_{QP}, G_{QQ}$ 分别为参考输入功率到输出功率的传递函数;其中  $G_1 = J_p \omega_0 s^2 + D_p s + H_{p\delta}$ ;  $G_2 = G_{QE} \cdot H_{q\delta} \cdot H_{pE}$ ;

现有文献多通过式(9)一式(12)的伯德图开展功率耦合分析<sup>[25]</sup>,该方法虽便于直观理解输入与输出之间的响应关系,但当输入与输出之间的量纲不同或多个耦合通道之间的变化趋势不一致时,则难以对系统的整体耦合强度进行量化,也难以对系统解耦提供指导。

## 2 基于伯德图与相对增益理论的功率耦合分析

### 2.1 相对增益理论

相对增益理论是量化多输入多输出系统 (Multi-input Multi-output, MIMO) 交互强度的有效

方法。对于任意 MIMO 系统, 仅需通过计算其 RGA 元素即可判断各控制环路之间的耦合强度。

MIMO 系统的相对增益  $\lambda_{ij}$  的定义如下<sup>[26]</sup>:

$$\lambda_{ij} = \frac{\partial y_i / \partial u_j | (\text{所有控制开环})}{\partial y_i / \partial u_j | (\text{除 } y_i - u_j \text{ 闭环外, 所有控制开环})} \quad (13)$$

式中:  $\lambda_{ij}$  为相对增益矩阵第  $i$  行第  $j$  列元素;  $y_i$  为第  $i$  个输出量;  $u_j$  为第  $j$  个输出量。

根据式(13)可知, RGA 参数  $\lambda_{ij}$  量化了 MIMO 系统中其他控制回路对  $y_i - u_j$  控制回路交互的影响强度。其中相对增益系数  $\lambda_{ij}$  有如下特性<sup>[31]</sup>:

$$1) \sum_{i=1}^n \lambda_{ij} = 1, \sum_{j=1}^n \lambda_{ij} = 1 \quad (i, j = 1, 2, \dots, n)。$$

2) 若对角线元素  $\lambda_{ii}$  满足  $0.8 \leq \lambda_{ii} \leq 1.2$ , 说明交互影响较小, 且越接近 1, 交互影响越小; 反之说明系统的交互影响比较严重。此外, 若  $\lambda_{ii} > 1$ , 说明系统存在负耦合, 由此可能会使得系统不稳定<sup>[31]</sup>。

除式(13)所示的相对增益系数计算方法外, 还可以通过 MIMO 系统的传递函数矩阵更简便地求解 RGA 元素<sup>[32]</sup>, 如式(14)所示。

$$\Lambda = \begin{bmatrix} \lambda_{11} & \lambda_{12} & \dots & \lambda_{1n} \\ \lambda_{21} & \dots & \dots & \dots \\ \vdots & \dots & \dots & \dots \\ \lambda_{n1} & \dots & \dots & \lambda_{nn} \end{bmatrix} = \mathbf{G}(s) \otimes [\mathbf{G}(s)^{-1}]^T |_{s=j2\pi f} \quad (14)$$

式中:  $\Lambda$  为相对增益矩阵;  $\otimes$  为哈德马积;  $\mathbf{G}(s)$  为系统的传递函数矩阵;  $j$  为虚数单位,  $f$  为频率。

由于 RGA 具有任意行、列元素求和为 1 的性质, 而 VSG 的闭环功率响应为 2 输入 2 输出系统, 因此在本研究中, 仅需分析其中 1 个元素(如第 1 行第 1 列元素)即可有效评估系统整体的功率耦合强度。

### 2.2 功率耦合分析框架

RGA 具备定量分析耦合的优势, 可将伯德图中不同量纲下的多耦合通道参数转化至标幺化的单一参数, 从而实现对整体耦合强度的评估。然而, 该方法无法建立耦合强度与功率响应特性的联系。对此, 本文借助伯德图分析功率环多通道响应特性的能力, 提出伯德图和 RGA 相配合的功率耦合分析框架, 如图 4 所示。具体流程如下:

1) 建立不同无功控制 VSG 的小信号模型, 得到  $\Delta P_0, \Delta Q_0$  到  $\Delta P, \Delta Q$  的  $2 \times 2$  传递函数矩阵, 进而绘制相应伯德图。

2) 根据伯德图分析各个传递函数的高低通特性、谐振峰值频率以及功率响应的谐振峰值, 以识别可能发生强耦合的频段。然后通过 RGA 定量分析系统谐振峰值频率附近的耦合强度。

3) 根据不同参数下 RGA 中参数的变化趋势结合伯德图的稳态增益以及谐振峰值的变化趋势分析耦合对 VSG 功率响应特性带来的正向或者负面的影响。

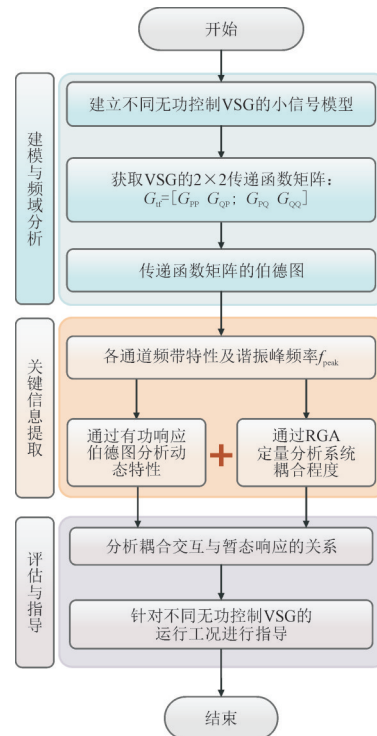


图 4 功率耦合强度量化与功率响应特性分析流程  
Fig.4 Process for power coupling strength quantification and power response characteristic analysis

## 3 不同类型无功控制对于功率耦合的影响

### 3.1 比例无功控制

VSG 的有功功率输出同时受  $G_{pp}$  和  $G_{qp}$  2 个闭环传递函数影响。图 5 为无功比例控制 VSG 输入到输出 4 个控制通道传递函数的伯德图, 由图 5(a) 和图 5(b) 可知,  $G_{pp}$  控制回路呈现出低通特性且在低于谐振峰值频率  $f_{peak}$  的频段  $G_{pp}$  的增益为 1, 即 0 dB, 而  $G_{qp}$  则呈现出高通特性, 低频段的增益趋近于 0, 表明即便在无功耦合影响下, 有功功率控制仍能够实现无差跟踪。另外, 随着  $D_q$  增大,  $G_{pp}$  的谐振峰值略有减小,  $G_{qp}$  大于峰值频率  $f_{peak}$  频段的增益和谐振峰值也有所降低, 从而减轻了动态过程中有功响应受无功参考变化的影响。

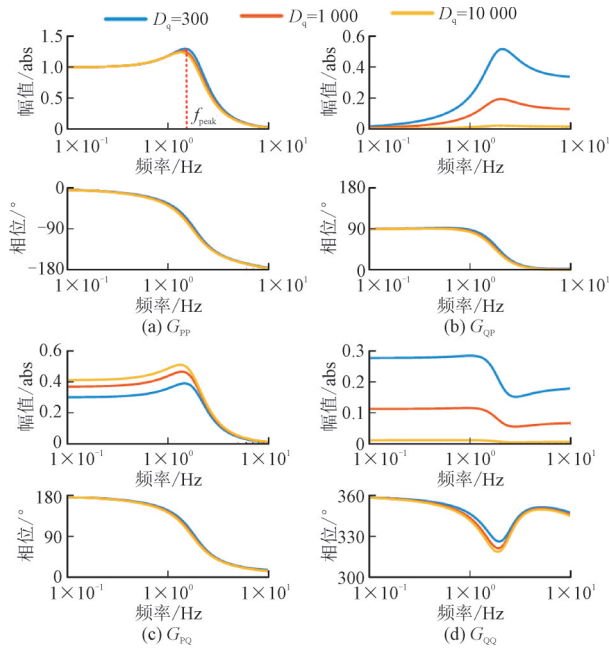


图5 无功下垂系数变化对VSG相对增益矩阵对角元的影响  
Fig.5 Effect of reactive power droop coefficient variation on diagonal elements of VSG relative gain matrix

根据图5可知,无功比例控制VSG中有功控制通道 $G_{PP}$ 的谐振峰值频率 $f_{peak}$ 位于1~2 Hz,因此着重分析该频率范围耦合对有功动态的影响。由图5(b)和图5(c)可知,非对角线项传递函数谐振峰值随 $D_q$ 增大的变化趋势相反,伯德图难以建立标幺化下的量化指标以判断系统是否需要解耦。因此,根据本文所提框架,采用RGA对系统整体耦合强度量化,以揭示功率耦合随参数和频率的变化关系。图6为RGA对角元 $\lambda_{11}$ 随无功下垂系数 $D_q$ 变化的规律。以 $D_q=1\ 000$ 为例,在低于1 Hz的范围内RGA的对角元 $\lambda_{11}$ 略大于1,表明有功环与无功环之间存在一定程度的交互影响,但耦合程度并不严重。由此可知,在该无功控制策略下,耦合并非是影响功率响应的主要因素。

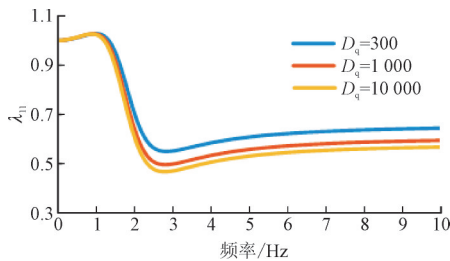


图6 不同无功调节系数下的VSG伯德图  
Fig.6 Bode diagram of VSG under different reactive power adjustment coefficients

### 3.2 无功惯量控制

无功惯量控制VSG的 $G_{PP}$ 和 $G_{QP}$ 的功率耦合特性与无功比例控制VSG相似。不同之处在于无功

惯量的引入可降低 $G_{QP}$ 在谐振峰值 $f_{peak}$ 附近及以上频段的增益。随着 $J_q$ 增大, $G_{QP}$ 受无功控制环高频分量的影响越小,但无法完全抑制。同时, $G_{PP}$ 受影响较小,图7(a)中谐振峰值总体呈现增大后减小趋势。

由于非对角线项传递函数随无功惯量系数变化的变化趋势相反,需要采用RGA对整体耦合进行定量分析。由图8可知,对角元 $\lambda_{11}$ 的峰值随 $J_q$ 先增大后减小,表明无功惯量控制使有功与无功环的耦合强度随 $J_q$ 增大呈先增强后减弱的趋势。

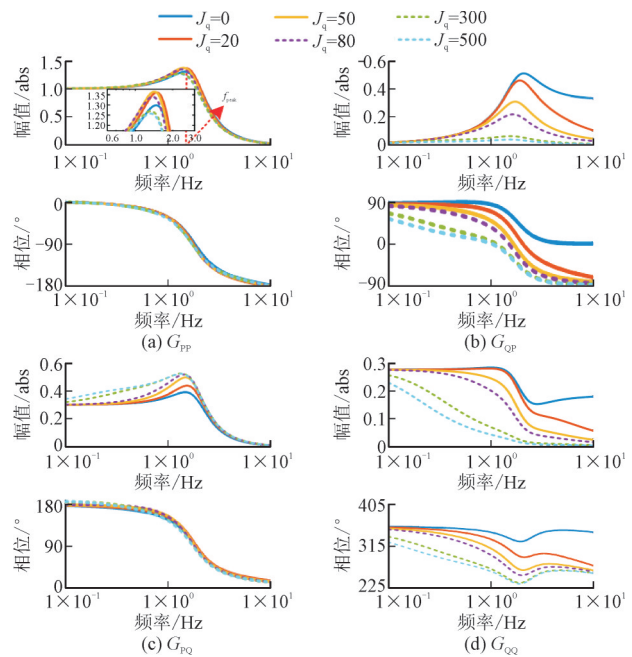


图7 不同无功惯量系数下VSG伯德图  
Fig.7 Bode diagram of VSG under different reactive power inertia coefficients

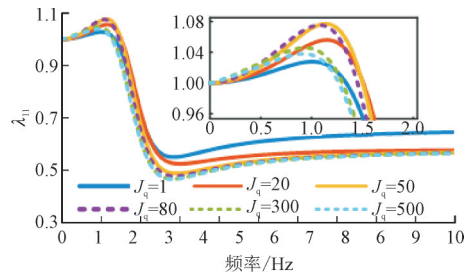


图8 无功惯量变化对VSG相对增益矩阵对角元的影响  
Fig.8 Effect of reactive power inertia variation on diagonal elements of VSG relative gain matrix

### 3.3 无功PI控制

图9为无功PI控制VSG输入到输出4个控制通道传递函数的伯德图,由图9(a)和图9(b)可知无功PI环节的引入几乎不会影响 $G_{PP}$ 和 $G_{QP}$ 位于低于 $f_{peak}$ 频段的增益,即不会影响有功功率的稳态输出。而积分参数 $k_{qi}$ 对 $G_{PP}$ 与 $G_{QP}$ 的谐振峰值均有较大的

影响,同时还使得  $G_{QP}$  抑制高频信号的能力变差。随着  $k_{qi}$  的增大,  $G_{PP}$  和  $G_{QP}$  的谐振峰值均是先增大后减小,但二者的拐点不同。同时,  $G_{QP}$  的高频抑制能力在不断被恶化。综上,无功 PI 环节不影响有功稳态输出,但显著降低动态响应特性。

同样,由于非对角线项传递函数的变化趋势不一致,因此采用 RGA 进一步分析功率耦合特性。如图 10 所示,随着积分系数  $k_{qi}$  的增大,系统在  $f_{peak}$  附近的耦合强度呈现先增强后减弱的趋势。在相同的阻感比下,无功 PI 控制 VSG 的有功动态恶化程度与耦合程度明显强于另外 2 种控制,说明 VSG 需要着重考虑通过解耦策略实现对有功动态响应的提升。

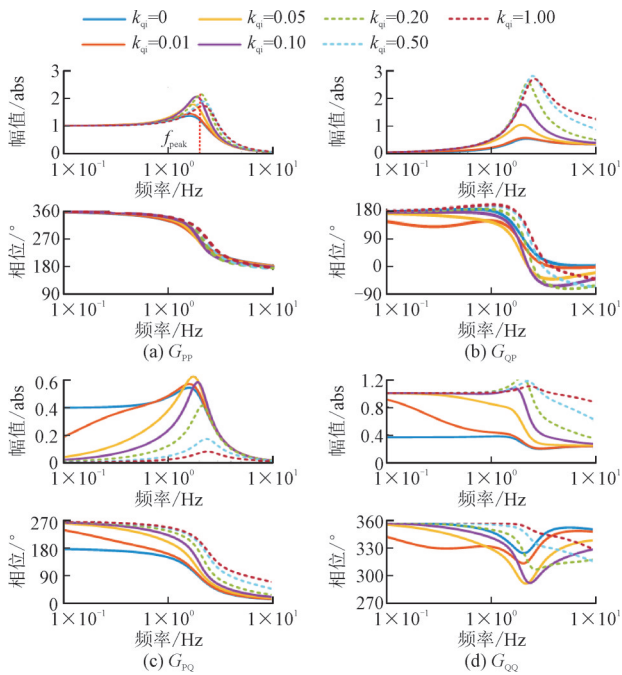


图9 不同无功积分系数下VSG伯德图  
Fig.9 Bode diagram of VSG under different reactive power integral coefficients

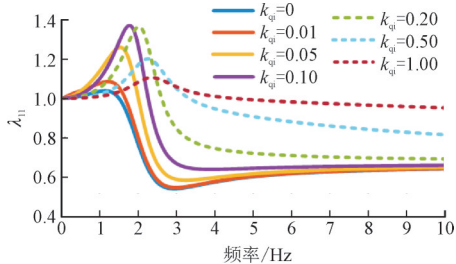


图10 无功PI控制器参数变化对VSG相对增益矩阵对角元的影响  
Fig.10 Effect of PI controller parameter variation on diagonal elements of VSG relative gain matrix for reactive power control

3种无功控制的关键参数对功率耦合的影响如表1所示。由于参数变化对耦合程度与有功振荡的影响趋势是一致的,因此可判断有功响应的恶化是由功率耦合导致的。

表1 无功控制参数对功率耦合和有功振荡的影响  
Table 1 Impact of reactive power control parameters on power coupling and active power oscillations

项目	$D_q$ 增大	$J_q$ 增大	$k_{qi}$ 增大
耦合影响	耦合强度略微减弱	先略有增强后减弱	先变强后减弱
有功振荡影响	峰值略微减小	峰值先增大后减小	峰值先增大后减小

### 3.4 线路阻感比对功率耦合的影响

由于线路阻感比对于功率耦合具有重要影响,本节通过改变线路阻感比分析其对于不同无功控制 VSG 功率耦合的影响。采用无功比例下垂、无功惯量以及无功 PI 控制时,RGA 对角元素曲线和  $G_{PP}$  的伯德图随线路阻感比的变化趋势如图 11 所示。

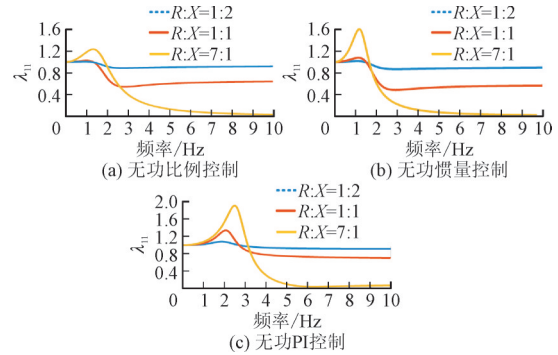


图11 3种无功控制策略下VSG的相对增益矩阵对角元随阻感比的变化  
Fig.11 Variation of diagonal elements in VSG relative gain matrix with R/X ratio under three reactive power control strategies

由图 11 可知,随着线路阻感比的增大,3种无功控制策略下 VSG 的功率耦合程度均有增加,但阻感比对 3 种控制的影响程度各不相同。在低阻感比下即  $R/X=1:2$  时,3 种类型无功控制 VSG 的 RGA 对角线参数差别不大,即耦合程度差异不大。而随着线路阻感比的增大,无功 PI 控制 VSG 在低频段功率耦合恶化程度最大,而无功比例 VSG 功率耦合恶化程度最小。

图 12 为 3 种不同无功控制 VSG 所对应  $G_{PP}$  的伯德图。由图 12 可知,VSG 的有功响应特性随阻感比的变化趋势与图 11 中的功率耦合变化趋势不同。无功比例下垂 VSG 的有功增益幅值随阻感比的增大呈现不断减小的趋势,原因是无功下垂控制本身带来的功率耦合不严重,同时较大的线路电阻

加速了动态过程中振荡能量的衰减。无功惯量和无功 PI 控制的 VSG 有功增益幅值变化趋势则相反,即随着阻感比增大,耦合增强,有功响应谐振峰值增大,表明其有功响应特性变差。原因是这 2 种无功控制对有功控制的影响较大,其劣化影响远大于线路电阻所能提供的阻尼。

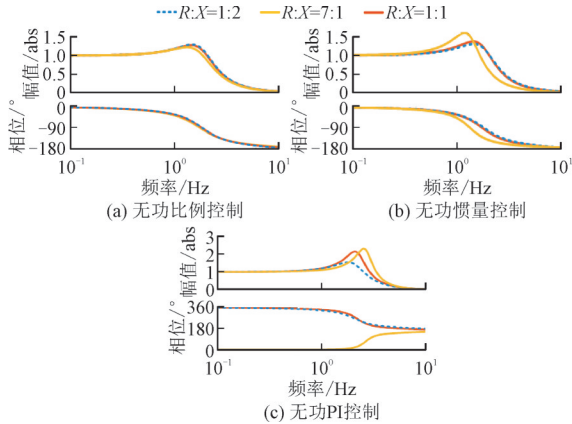


图 12 3种无功控制策略下VSG系统的幅频与相频特性随阻感比的变化

Fig.12 Variation of magnitude-frequency and phase-frequency characteristics of VSG system with R/X ratio under three reactive power control strategies

表 2 为阻感比对功率耦合和响应特性的影响,其总结了线路阻感比对于不同无功控制 VSG 功率耦合和响应特性的影响,可为无功控制策略的选择提供借鉴。例如,在线路阻感比较大的低压配电网中,若从功率耦合和响应特性 2 个方面进行考虑,应优先采用比例下垂控制。当低压配网对电压瞬态支撑能力有一定需求时则可以考虑无功惯量型 VSG 的接入,且为了保证其动态性能, $J_q$  的取值应较大。当线路阻感比较小时,3 种无功控制策略下的 VSG 功率耦合程度差异不大,为保证无功功率的准确跟踪可优先采用无功 PI 控制型 VSG。此外,必要时可将其按一定的比例组合接入电网。

表 2 R/X增大对功率耦合和响应特性的影响

Table 2 Influence of increasing R/X on power coupling and response characteristics

R/X 增大	无功比例	无功惯量	无功 PI
功率耦合	略有增强	增强	显著增强
有功响应特性	谐振峰值减小	谐振峰值增大	谐振峰值显著增大

## 4 仿真分析

为验证前述分析结论的正确性,本节搭建了如图 1 所示的不同无功控制策略下的 VSG 并网系统,

验证了控制参数以及线路阻感比对功率耦合和动态响应特性的影响。针对采用不同无功控制下的 VSG,均在系统达到稳态后即第 3 s,分别在其有功/无功参考值上施加 1 个-2000 W/VAR 的参考指令跳变,以观察有功功率响应。线路与控制参数如表 3 所示。

表 3 控制参数及线路参数

Table 3 Control parameters and line parameters

参数	数值	参数	数值
直流侧电压 $V_{dc}/V$	800	电网电感 $L_g/mH$	8.25
输出电压额定值 $E_0/V$	311	电网电感等值电阻 $R_g/\Omega$	2.55
有功功率额定值 $P_0/kW$	10	虚拟惯量 $J/kg \cdot m^2$	1
无功功率额定值 $Q_0/var$	0	有功下垂系数 $K_\omega/(W \cdot s \cdot rad^{-1})$	10 000/ $\pi$
角频率额定值 $\omega_0/(rad \cdot s^{-1})$	100 $\pi$	无功惯量 $J_q/A \cdot s$	50
滤波电感 $L_f/mH$	3	无功下垂系数 $D_q/(var \cdot V^{-1})$	333.3
滤波电感等值电阻 $R_f/\Omega$	0.094	无功 PI 比例系数 $K_{qp}$	1/ $D_q$
滤波电容 $C_f/\mu F$	10	无功 PI 积分系数 $K_{qi}$	0.231 2

### 4.1 参数影响分析

1)比例无功控制。不同无功下垂系数的响应如图 13 所示。观察图 13(a)和图 13(b)可以发现,随着无功下垂系数的减小, $G_{PP}$ 与 $G_{QP}$ 的功率振荡峰值分别由 2 378 W,0 W 增大至 2 449 W,774 W。该现象验证了第 3 节分析中增大  $D_q$  可以削弱有功参考和无功参考到有功输出增益的结论。

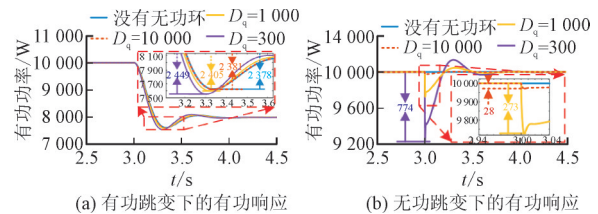


图 13 无功下垂系数变化对 VSG 功率动态响应的影响

Fig.13 Effect of reactive power droop coefficient variation on VSG power dynamic response

2)无功惯量 VSG 仿真验证。图 14 为有功扰动下无功惯量 VSG 的功率响应,由图 14(a)可知,随着无功惯量参数  $J_q$  的增大,有功响应增益由 2 450 W 增大至 2 515 W 再降低至 2 449 W,但总体上对有功响应的影响不大。图 14(b)中  $G_{QP}$  的增益随  $J_q$  增大呈现出单调减小的趋势。其中  $G_{QP}$  由 785 W 单调减小至 83 W。由此验证了 3.2 节中的分析结果。

3)无功 PI VSG 仿真验证。图 15 为无功扰动下无功 PI VSG 的功率响应,图 15(a)中有功功率幅值增益随  $k_{qi}$  增大由 2 449 W 增大至 2 842 W,再减小至 2 768 W。在本文所分析的阻感比条件下,相

较于其他 2 种控制,无功积分参数的引入使得有功响应的振荡更为严重。

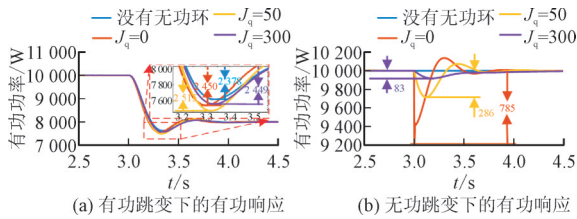


图 14 有功扰动下无功惯量对 VSG 功率动态响应的影响  
Fig.14 Effect of reactive power inertia on VSG power dynamic response under active power disturbance

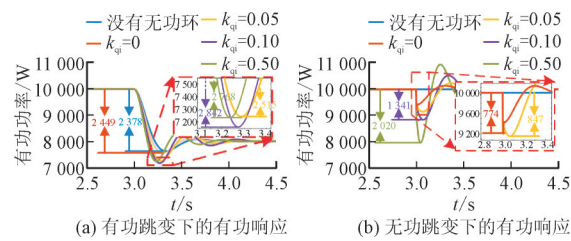


图 15 无功扰动下无功惯量对 VSG 功率动态响应的影响  
Fig.15 Effect of reactive power inertia on VSG power dynamic response under reactive power disturbance

#### 4.2 线路阻感比对功率响应的影响

图 16 为不同阻感比下 3 种无功控制 VSG 在相同扰动下的功率响应曲线,对比图 16 中(a),(b),(c)可以发现,在线路阻感比较低时,3 种不同无功控制策略下 VSG 的有功响应特性差异不大。而随着线路阻感比的增加,各机组动态响应的差异也随之增大。其中无功比例控制的有功响应振荡峰值随着线路阻感比的增大略有减小;而其余 2 种控制有功响应的动态过程均被恶化,且无功 PI 控制的恶化程度更为严重。该现象与 3.4 节中的分析结果一致。

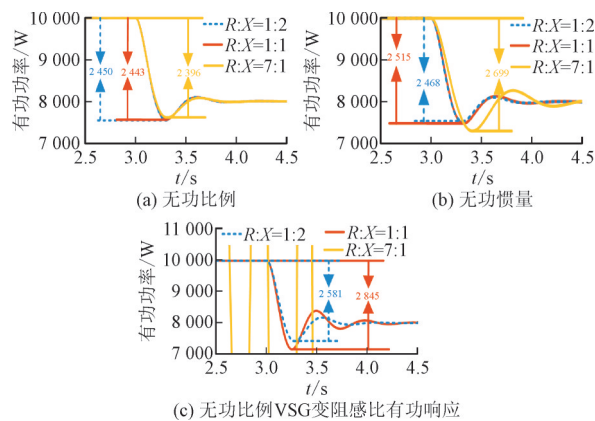


图 16 3 种无功控制策略在不同阻感比下的 VSG 功率动态响应对比  
Fig.16 Comparison of VSG power dynamic responses under three reactive power control strategies at different R/X ratios

## 5 结论

本文结合伯德图与相对增益理论,提出了一种适用于 VSG 的功率耦合分析框架,并系统比较了多类型无功控制对于 VSG 功率耦合特性的影响。主要结论如下:

1)伯德图用于观察稳态增益及控制回路的谐振峰值频段,RGA 定量分析不同频率下的耦合程度。二者结合可有效量化功率耦合与响应特性的关系,并为无功策略的选择提供指导。

2)减小无功比例系数  $D_q$ 、增大无功惯量参数  $J_q$  和无功积分参数  $k_{qi}$  均会导致耦合强度增大,进而使有功动态响应过程被恶化。其中无功惯量的耦合程度略强于无功比例,远小于无功 PI 控制。

3)在较大阻感比下优先选择无功比例型 VSG 接入系统;若电网对电压瞬态支撑能力有较高要求,则考虑采用无功惯量型 VSG 接入系统;当电网阻感比较小时,为保证电网无功功率跟踪精度应采用无功 PI 控制的 VSG 接入电网。

### 参考文献

- [1] 许钊,胡长斌,王斐然,王弋飞.改进型并网逆变器下垂控制策略研究[J].高压电器,2017,53(07):106-112.  
XU Fan, HU Changbin, WANG Feiran, et al. Research on Droop Control Strategy of Improved Grid-connected Inverters[J]. High voltage apparatus, 2017, 53(7): 106-112.
- [2] 阮亮,王杨,肖先勇,等.跟网型和构网型变流器动态交互特性分析[J].智慧电力,2024,52(7):103-110.  
RUAN Liang, WANG Yang, XIAO Xianyong, et al. Dynamic interaction characteristic analysis of grid-following and grid-forming inverters[J]. Smart Power, 2024, 52(7): 103-110.
- [3] 曾四鸣,梁纪峰,马燕峰,等.VSG附加自抗扰阻尼控制抑制低频振荡研究[J].电网与清洁能源,2022,38(11):27-34.  
ZENG Siming, LIANG Jifeng, MA Yanfeng, et al. Research on VSG Additional Active Disturbance Rejection Damping Control to Suppress Low Frequency Oscillations [J]. Power System and Clean Energy, 2022, 38(11): 27-34.
- [4] 马俊鹏,李磊,迟程斌,等.宽短路比工况下构网型逆变器功率自同步控制的稳定性分析[J].电力系统保护与控制,2025,53(7):165-173.  
MA Junpeng, LI Lei, CHI Chengbin, et al. Stability analysis of power self-synchronization control of grid-forming converters in wide range of short-circuit ratio conditions[J]. Power System Protection and Control, 2025, 53(7): 165-173.
- [5] 张建坡,柴欣茹,辛光明,等.换相失败场景下构网型风机对送端暂态过电压影响因素分析及抑制策略研究[J].智慧电力,2024,52(9):1-8,17.  
ZHANG Jianpo, CHAI Xinru, XIN Guangming, et al. Influencing factors of GFM-PMSG on sending-end transient overvoltage under commutation failure & its suppression strategies[J]. Smart Power,

- 2024, 52(9):1-8, 17.
- [6] 姜汉周, 潘欢, 纳春宁. 混合负载下基于虚拟振荡器控制的离网逆变器控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(9): 88-96.  
JIANG Hanzhou, PAN Huan, NA Chunqing. Island inverter control strategy based on improved virtual oscillator control under mixed load[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(9): 88-96.
- [7] PRABHA K. 电力系统稳定与控制[M]. 北京: 中国电力出版社, 2002.
- [8] 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.
- [9] 姜静雅, 王玮, 吴学智, 等. 基于自适应无功功率补偿的虚拟同步机功率解耦策略[J]. 电工技术学报, 2020, 35(13): 2747-2756.  
JIANG Jingya, WANG Wei, WU Xuezhi, et al. Power decoupling strategy in virtual synchronous generator based on adaptive reactive power compensation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(13): 2747-2756.
- [10] 闫来清, 邓熙炜, 赵喆, 等. 基于自适应前馈补偿的VSG功率解耦控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(24): 64-73.  
YAN Laiqing, DENG Xiwei, ZHAO Zhe, et al. VSG power decoupling control strategy based on adaptive feedforward compensation[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(24): 64-73
- [11] 颜湘武, 崔森, 贾焦心. 虚拟稳态同步负阻抗的VSG功率解耦策略[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(18): 102-113.  
YAN Xiangwu, CUI Sen, JIA Jiaoxin. Virtual steady state synchronous negative impedance of a VSG power decoupling strategy[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(18): 102-113
- [12] LI B, ZHOU L. Power decoupling method based on the diagonal compensating matrix for VSG-controlled parallel inverters in the microgrid[J]. Energies, 2017, 10(12): 2159.
- [13] 李武华, 王金华, 杨贺雅, 等. 虚拟同步发电机的功率动态耦合机理及同步频率谐振抑制策略[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(2): 381-391.  
LI Wuhua, WANG Jinhua, YANG Heya, et al. Power Dynamic coupling mechanism and resonance suppression of synchronous frequency for virtual synchronous generators[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(2): 381-391.
- [14] LI C, YANG YQ, MIJATOVIC N, et al. Frequency stability assessment of grid-forming VSG in framework of MPME with feedforward decoupling control strategy[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2021, 69(7): 6903-6913.
- [15] 孙大卫, 刘辉, 吴林林, 等. 虚拟同步发电机对低频振荡的影响建模与特性分析[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(24): 134-144.  
SUN Dawei, LIU Hui, WU Linlin, et al. Modeling and characteristic analysis on influence of virtual synchronous generator on low-frequency oscillation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(24): 134-144.
- [16] LONG B, YANG WD, ZHU SH, et al. Power-frequency admittance model of multi-VSGs grid-connected system considering power coupling[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2024, 155: 109513.
- [17] 罗朝旭, 刘洋, 罗钦, 等. 基于动态下垂系数的低压微电网无功控制策略[J]. 电力建设, 2022, 43(1): 78-86.  
LUO Zhaoxu, LIU Yang, LUO Qin, et al. Reactive Power Control Strategy of Low-Voltage Microgrid Applying Dynamic Droop Coefficient[J]. Electric Power Construction, 2022, 43(1): 78-86.
- [18] 任明炜, 邵聪, 施凯, 等. 基于改进型虚拟阻抗的虚拟同步发电机动态功率解耦控制[J]. 发电技术, 2025, 46(4): 797-806.  
REN Mingwei, SHAO Cong, SHI Kai, et al. Dynamic Power Decoupling Control of Virtual Synchronous Generator Based on Improved Virtual Impedance[J]. Power Generation Technology, 2025, 46(4): 797-806.
- [19] MOHAMMED N, ZHOU WH, BAHRANI B. Impacts of the reactive power control on the small-signal stability of grid forming inverters [C]. 2023 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies-Asia (ISGT Asia), Auckland, New Zealand, IEEE, 2023: 1-5.
- [20] JOSEP M G, JUAN C V and REMUS T. Hierarchical control of droop-controlled DC and AC microgrids—a general approach towards standardization[C]. 2009 35th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics, Porto, Portugal, 2009, pp. 4305-4310.
- [21] ZHONG Q C, PHILONG N, MA Z Y. et al. Self-synchronized synchronverters: inverters without a dedicated synchronization unit [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(2): 617-630.
- [22] TOSHINOBU S, YUSHI M and TOSHIFUMI I. Oscillation Damping of a Distributed Generator Using a Virtual Synchronous Generator[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2014, 29(2): 668-676.
- [23] 杜建鹏, 赵晋斌, 曾志伟, 等. 基于虚拟功角功率控制的VSG增强功率解耦策略[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(22): 8808-8819.  
DU Jianpeng, ZHAO Jinbin, ZENG Zhiwei, et al. Enhanced power decoupling strategy for VSG with power control based on virtual power angle[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(22): 8808-8818.
- [24] ZHANG L D, LENNART H, HANSPETER N. Power-synchronization control of grid-connected voltage-source converters[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2010, 25(2): 809-820.
- [25] 李威, 马美玲, 孙伟卿. 考虑功率耦合的构网型多VSG系统频率振荡特性分析[J]. 电力工程技术, 2025, 44(2): 44-54.  
LI Wei, MA Meiling, SUN Weiqing. Analysis of frequency oscillation characteristics in grid-forming multi-VSG systems considering power coupling[J]. Electric Power Engineering Technology, 2025, 44(2): 44-54.
- [26] 谢震, 杨曙昕, 代鹏程, 等. 构网型全功率风电机组网侧变流器耦合分析及抑制策略[J]. 电工技术学报, 2023, 38(14): 3745-3758.  
XIE Zhen, YANG Shuxin, DAI Pengcheng, et al. Grid-side coupling analysis and suppression strategy of grid-forming full-power wind turbines[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(14): 3745-3758.

(责任编辑 杨海波)

收稿日期: 2025-07-06; 修改日期: 2025-09-22

作者简介: 王杨(1990), 男, 浙江杭州人, 研究员, 博士研究生导师, 主要研究方向为电能质量、新能源并网、电力系统广域监测与控制。E-mail: fwang@scu.edu.cn

杨孟凌(1996), 男, 通信作者, 四川巴中人, 博士研究生, 研究方向为电力电子化电力系统稳定性分析与控制。E-mail: monlinyung@163.com