

虚拟同步发电机并网稳定性与控制技术研究综述*

李智¹, 刘辉², 刘明波¹, 程雪坤², 张扬帆², 梅勇³, 陈亦平³

[1. 华南理工大学, 广东 广州 510641;

2. 国网冀北电力科学研究院(华北电力科学研究院有限责任公司), 北京 100045;

3. 中国南方电网电力调度控制中心, 广东 广州 510663]

摘要: 虚拟同步发电机(VSG)技术是新能源由“被动调节”转为“主动支撑”的新一代新能源发电技术, 是使新能源发电具备惯量支撑、一次调频和主动调压等主动支撑电网能力的有效路径, 是解决“双高”电力系统所面临问题的探索实践。综述了电压控制型和电流控制型新能源虚拟同步发电机的控制模式, 总结了电流控制、电压控制和改进型虚拟同步发电机的运行特征, 并从技术原理的角度分析了其优势和不足; 围绕虚拟同步发电机并网系统稳定性分析问题和暂态控制问题, 对常用稳定性分析方法进行了概述, 梳理和总结了目前关于改进型虚拟同步发电机对电力系统稳定性影响和振荡问题的研究。在此基础上, 指出了虚拟同步发电机稳定性分析、振荡抑制和故障电压穿越的研究重点。最后对 I-VSG 与同步机组及接入电网的交互作用机制、提高支撑电力系统动态稳定性的技术进行了展望, 指出了后续研究的关键问题, 提供了可参考的解决思路。

关键词: 虚拟同步发电机(VSG); 控制策略; 稳定性; 振荡抑制; 支撑能力

中图分类号: TM712 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2023)11-0001-10

doi: 10.12177/emca.2023.131

Research Overview of Grid-Connected Virtual Synchronous Generator Stability and Control Technologies*

LI Zhi¹, LIU Hui², LIU Mingbo¹, CHENG Xuekun², ZHANG Yangfan², MEI Yong³, CHEN Yiping³

[1. South China University of Technology, Guangzhou 510641, China.

2. State Grid Jibei Electric Power Co., Ltd., Research Institute (North China Electric Power Research Institute Co., Ltd.), Beijing 100045, China;

3. China Southern Power Grid Company Limited Electric Power Dispatch and Control Center, Guangzhou 510663, China]

Abstract: Virtual synchronous generator (VSG) technology is the new generation renewable energy power generation technology that transforms it from “passive regulation” to “active support”, that is an effective path to make the renewable energy power generation have the ability to active support the power grid with inertia support, primary frequency regulation and active voltage regulation, and the virtual synchronous generator technology is an exploratory practice for solving the problems of “double-high” power system. The control modes of voltage-controlled and current-controlled of virtual synchronous generator, the operating characteristics of current control, voltage control and improved virtual synchronous generators are summarized, and the comparative advantages and shortcomings are analyzed with the view of technical principles. Focusing on the stability analysis problems and transient control of the grid-connected virtual synchronous generator, the common stability analysis methods are summarized, and the current

收稿日期: 2023-05-28; 收到修改稿日期: 2023-08-07

* 基金项目: 国家自然科学基金(2022YFB2403500)

作者简介: 李智(1987—), 男, 博士研究生, 研究方向为电力系统稳定与控制。(通信作者)

research on the influence on the power system stability and oscillation of grid-connected improved virtual synchronous generators is summarized. On this basis, the research keys of virtual synchronous generator stability analysis, oscillation suppression and fault voltage ride-through are pointed out. Finally, the interaction mechanism and dynamic stability improvement technology of improved virtual synchronous generators are prospected, and the key problems of follow-up research are pointed out, and the referenced solution paths are proposed.

Key words: virtual synchronous generator (VSG); control strategy; stability; resonance suppression; supporting capacity

0 引言

新能源发电的大规模应用被认为是应对能源危机、环境污染等问题的一种可靠方案,由于其随机性、间歇性、波动性的特点^[1-3],新型变流器控制技术得到了广泛应用。合理、有效的变流器控制策略对于提升新能源发电的供电质量、可靠性和电网支撑能力具有重要的意义^[4]。为改善电力系统的稳定性以及解决新能源发电并网后给电力系统带来的各种问题,借鉴传统电力系统的工作原理,新能源发电模拟或部分模拟同步发电机频率及电压控制特性已成为亟待突破的关键技术^[5-6]。

首先提出虚拟同步发电机(VSG)基本理念的是欧洲的 VSYNC 工程,其提出的 VSG 从外特性上等效为受控电流源;后来,国内外学术机构也提出多种从外特性上可以等效为受控电压源的虚拟同步发电机^[7]。电流控制型 VSG 适用于联网运行,但无法实现孤岛运行,在弱电网下因失稳风险难以提供频率及电压支撑。为消除电流控制型 VSG 的缺陷,电压控制型 VSG 技术应运而生,其能够自主构网和孤岛运行,在弱电网下具备更强的鲁棒性。此外,针对不同并网适应性问题,国内外学者提出了 VSG 结构下的解决方法。文献[8]揭示了 VSG 在并网运行中产生高频振荡的机理,分析含滤波器的多台 VSG 与电网之间相互作用,并采用虚拟阻抗的方法进行高频谐振抑制。文献[9]分析了具有电网支撑能力的新能源机组之间的虚拟惯量引起功率振荡的原理,并通过合理设计控制参数的方法实现了系统振荡抑制和多新能源机组间的功率协调控制。文献[10]分析了 VSG 在弱电网环境下的稳定运行与发电特性,基于数学模型和暂态仿真分析了引入 VSG 控制策略对频率稳定性的影响,以及同步频率振荡问题及抑制策略。目前关于虚拟同步发电机技术的研究集中在变流器优化控制方面,但是在理论及应

用上仍有很多问题需深入探索。

本文首先分析了电流控制型、电压控制型 VSG 的控制原理、控制策略和参与电力系统调频的基本原理及特点,对已有的技术方案进行了简要总结和对比;其次,分析了改进型 VSG 的不同控制策略及运行原理,进一步对并网运行环境下 VSG 的稳定性分析方法、振荡机理与抑制策略和故障电压穿越技术进行了综述;最后,对 I-VSG 与同步机组及接入电网的交互作用机制、分析支撑电力系统动态稳定性的技术等关键问题进行了展望,指出了后续研究的重点,并提供了可参考的解决思路。

1 虚拟同步发电机基本原理

1.1 电流控制型虚拟同步发电机

基于直接电流控制模式,近似模拟同步发电机的摇摆方程、有功—频率、无功—电压控制,形成电流控制型虚拟同步发电机(C-VSG)。

1.1.1 控制策略 A

C-VSG 控制策略 A 控制模型采用模拟转子运动方程的方式,包括模拟调频控制器模型和同步发电机本体模型两部分,控制策略 A 的有功调频控制框如图 1 所示。C-VSG 调频控制器模型和同步发电机本体模型如式(1)和式(2)所示:

$$P_m = K_\omega(\omega_0 - \omega_g) + P_{ref} \quad (1)$$

$$\begin{cases} J \frac{d\omega}{dt} = \frac{P_m - P_e}{\omega} - K_{Dp}(\omega - \omega_g) \\ \frac{d\theta}{dt} = \omega \\ \delta = \theta - \theta_g \\ P_e = \frac{V_t \cdot E \cdot \sin\delta}{X} \\ i_{dref} = \frac{P_e}{V_{dc}} \end{cases} \quad (2)$$

式中: K_ω 为同步发电机调差系数; P_m 为机械功率; P_e 为电磁功率; P_{ref} 为有功功率指令值; ω_0 为

额定角速度; ω 为 VSG 角速度; ω_g 为电网角速度; K_{Dp} 为阻尼系数; J 为虚拟惯量; V_1 为机端电压; E 为内电势; X 为定子阻抗; θ 为电角度; θ_g 为电网相角; δ 为功角; i_{dref} 为 d 轴电流参考值; V_{dc} 为直流母线电压。

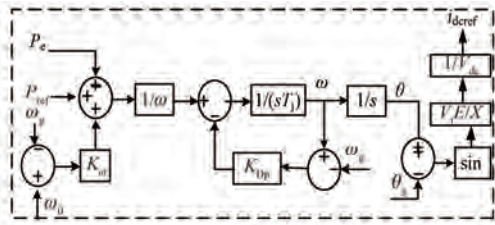


图1 控制策略 A有功调频控制框图

1.1.2 控制策略 B

C-VSG 控制策略 B 采用附加频率控制信号方式,通过在初始电流值附加线性模拟一次调频、惯性及阻尼特性的控制变量,实现有功调频,其有功调频控制框图如图 2 所示,控制方式如式(3)所示:

$$\begin{cases} T_j = \frac{J\omega^2}{P_N} \\ i_{boost_ref} = i_{boost_0} + K_f \frac{(f_N - f_0) P_N}{f_N V_{dc}} - \frac{T_j \Delta f P_N}{f_N \Delta t V_{dc}} \end{cases} \quad (3)$$

式中: i_{boost_0} 为初始电流给定值; f_N 为额定频率; f_0 为电网实际频率; P_N 为额定功率; K_f 为有功调频系数; T_j 为虚拟惯性时间常数; Δf 为电网频率变化量; Δt 为对应电网频率变化的时间。

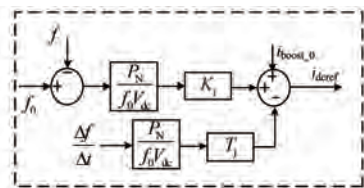


图2 控制策略 B有功调频控制框图

C-VSG 能够呈现有功调频外特性,能近似模拟同步发电机有功调频特性,但无法模拟励磁调节机理。此外,由于秉持电流源特性,并依赖锁相环,其只能应用在并网或有同步发电机组网的微电网模式下。

1.2 电压控制型虚拟同步发电机

电压控制型虚拟同步发电机(V-VSG)基于同步发电机转子运行方程和励磁控制设计控制策略,其自赋内电势,变流装置外特性为受控电压

源,可运行在并网或孤岛模式下,实现模式无缝切换。V-VSG 控制策略分为基于虚拟惯性模拟的内禀电压控制策略^[11]和考虑电磁暂态模型的 Synchronverter 控制策略^[12]。

1.2.1 虚拟惯性频率控制策略

虚拟惯性频率控制策略采用 $\omega-P$ 阻尼控制器作为 V-VSG 的一次调频方式,基于转子运动方程进行虚拟惯量控制,从功角特性角度模拟同步发电机的摇摆方程,使得变流器具备近似同步发电机的惯量和一次调频响应,但无电磁方程,未体现电磁暂态物理过程,控制原理如图 3 所示。

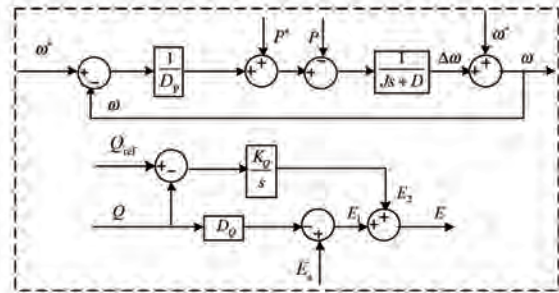


图3 虚拟惯性频率控制框图

1.2.2 Synchronverter 控制策略

Synchronverter 控制策略通过对同步发电机进行物理建模,VSG 电磁暂态过程的数学模型如式(4)所示:

$$\begin{cases} E = \omega M_f i_f \sin\theta \\ P = \omega T_e = \omega M_f i_f \langle i \cdot \sin\theta \rangle \\ Q = \omega M_f i_f \langle i \cdot \cos\theta \rangle \end{cases} \quad (4)$$

式中: M_f 为转子和定子绕组间的互感系数; i_f 为励磁电流; T_e 为电磁转矩; P 为有功功率; Q 为无功功率; E 为内电势。

基于同步发电机机械—电磁物理模型,通过附加有功调频和励磁控制器,构建 Synchronverter,如图 4 所示。

Synchronverter 控制策略通过对同步发电机电磁暂态特性进行模拟,使新能源机组具备转子惯性、有功调频及励磁调压功能,具备有功、无功的无差控制能力。但有功、无功未实现解耦控制,且功率外环控制环路引入积分环节,存在滞后环节,系统存在振荡模式,在大扰动下可能造成系统失稳。

综上所述,C-VSG 和 V-VSG 在实现原理上有很大区别,前者仅模拟了同步发电机的外特性,后

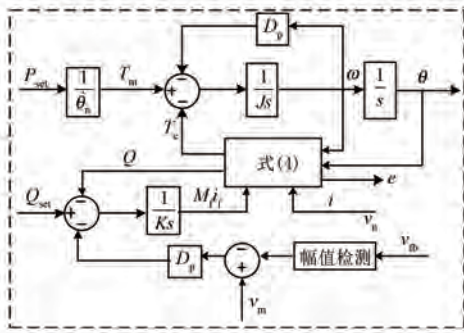


图4 Synchronverter型V-VSG功率控制策略

者模拟了同步发电机的转子运动方程。C-VSG 基于附加频率信号模式,控制过程依赖锁相环节生成电角度,且在弱电网环境下难以提供电压支

撑,无法自组网,存在与常规变流器类似的振荡、失稳模式,但由于没有完全模拟同步发电机的转子运行方程,不会出现类似于同步发电机的功角振荡;V-VSG 适用于并网或孤岛模式,可实现模式无缝切换,能够自主构网,更接近同步发电机,但存在有功、无功耦合,运行响应滞后,在大扰动下可能造成系统失稳等问题。

2 改进型虚拟同步发电机控制策略

基于改进同步发电机结构的虚拟同步发电机(I-VSG)整体控制策略 A 和 B 分别如下。

2.1 控制策略 A

I-VSG 整体控制策略 A 如图 5 所示。

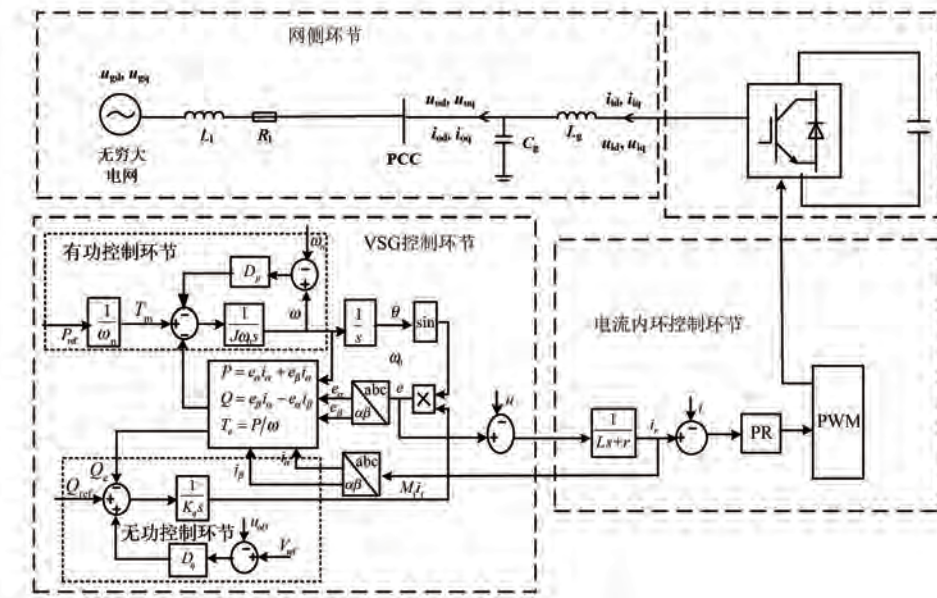


图5 改进型虚拟同步机控制策略 A 框图

I-VSG 输出电磁转矩和无功功率^[13-14] 如式(5)所示:

$$\begin{cases} T_e = P/\omega_n - D_p(\omega - \omega_n) - J_d(\omega - \omega_n)/dt \\ Q = Q_{ref} - D_q(V_{ref} - u_{od}) \end{cases} \quad (5)$$

式中: ω 为机械角速度; ω_n 为额定角速度; D_p 为有功调频系数; J_d 为转动惯量; D_q 为无功调压系数; T_e 和 Q 分别为有功功率和无功功率指令值; P 和 Q_{ref} 分别为有功功率和无功功率参考值; V_{ref} 为机端额定电压; u_{od} 为 d 轴电压。

运行过程中,I-VSG 通过有功控制环节输出相角,经无功控制环节输出电压参考值,得到 $\alpha\beta$ 坐标系下的电压分量。电动势 e 与电网电压 u 的

偏差除以虚拟阻抗得到 $\alpha\beta$ 坐标系下的电流分量,通过 PR 控制、静止坐标系变换,驱动 PWM 脉冲控制开关通断。

综上所述,I-VSG 在传统虚拟同步发电机基础上增加电流内环,通过双闭环模式,控制功率输出,实现新能源机组对系统的频率、电压响应。这种控制模式的 I-VSG 并网系统,能够有效增加系统总体惯量,提高系统的频率-电压稳定性。

2.2 控制策略 B

I-VSG 整体控制策略 B 如图 6 所示。I-VSG 控制策略 B 由功率外环和电流内环构成,其中,有功控制环节模拟同步发电机的惯性、一次调频,

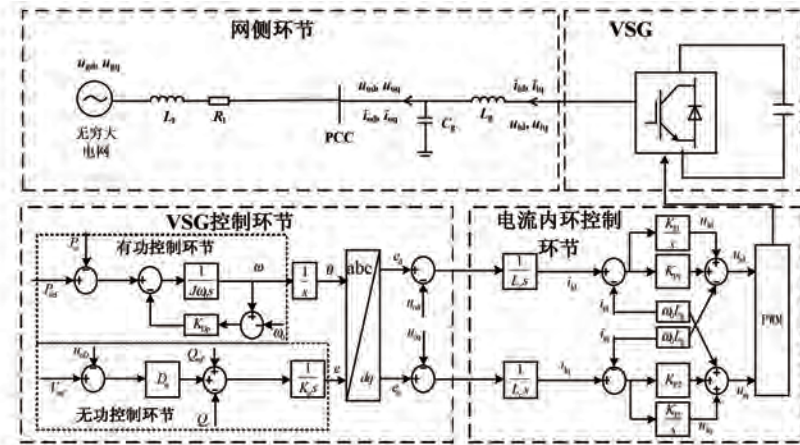


图6 改进型虚拟同步机控制策略B框图

无功控制环节模拟无功调压特性,电流内环控制采用PI控制, dq 轴电流解耦。

控制策略B将电压在 dq 坐标系下进行分解。运行过程中,I-VSG根据自动发电控制(AGC)、自动电压控制(AVC)或最大功率点(MPPT)指令得到有功功率及无功功率的参考值。然后,经有功控制环节输出相角,经无功控制环节输出电压参考值。再根据坐标变换,由平面 abc 坐标下的电压参考值旋转并计算获得 dq 坐标系下 d 、 q 轴分量上的电压参考值,经虚拟阻抗控制环节,得到电流 d 、 q 轴分量,通过PI控制,得到 d 、 q 轴电压矢量值,驱动PWM发生器产生脉冲,以控制功率器件的通断。输入电网电压角频率 ω_0 直接采用系统额定频率,无需锁相环。

综上所述,基于控制策略B的I-VSG可以提高新能源发电对电网的支撑性,采用内禀自同步机制来模拟同步发电机频率、电压暂态响应,为系统提供一次调频、无功调压等支撑功能。与策略A相同,策略B也是基于电流内环对设备进行电流幅值控制,且都具备虚拟转动惯量,从而起到支撑电力系统频率稳定性的作用。

3 虚拟同步机稳定性与故障电压穿越

相比于同步发电机,I-VSG参数模型与其并不完全等价,I-VSG的设备参数、并网系统的耦合效应,会对电力系统稳定性产生影响。为探究I-VSG控制参数、滤波参数对并网系统稳定性的影响及诱因,文献[15]构建I-VSG的高阶小信号模型,基于该模型,分析了不同参与因子及其根轨迹

和稳定性。为研究控制参数的灵敏度,文献[16]构建I-VSG的小信号分析模型,研究了电气、控制等参数对I-VSG控制特性的影响,基于最优二阶系统,形成I-VSG惯性时间常数和阻尼系数参数整定方法。针对I-VSG的参数优化设计问题,文献[17]通过小信号模型观察开关频率、功率等级对I-VSG并网系统稳定运行的影响,比较系统稳定运行边界和参数的要求,得到I-VSG控制器参数优化设计方法。文献[18]通过开环频率特性,分析了并网系统中I-VSG的暂态响应特性和稳定性,建立自适应改变的I-VSG虚拟惯性控制参数模型,提高了I-VSG暂态稳定性。I-VSG的小干扰稳定性和暂态稳定性与传统同步发电机在一定程度上类似,受到扰动时同样存在功角的摇摆过程,且考虑到应用I-VSG的电力电子设备的特性及其参数的可调节性,I-VSG的并网稳定问题会更加复杂。

3.1 虚拟同步发电机稳定性分析

常规新能源机组并入电网后,如果控制策略不合理或控制参数设置不当,可能会出现振荡问题。一方面,常规新能源机组通过电力电子变换器接入电网,而电力电子变换器产生的大量高频谐波需要利用滤波器滤除。由于LC、LCL等滤波器的高阶特性,以及控制器延时的影响,当多台含滤波器的电力电子变换器以及电网之间相互作用时,可能会出现高频振荡现象。文献[19]和[20]揭示了新能源机组在微电网中高频振荡的机理,并利用虚拟阻抗的方法对系统高频振荡进行抑制。另一方面,在利用I-VSG技术为新能源

机组提供主动支撑电网能力时, I-VSG 引入的支撑惯量可能会导致系统发生同步频率附近的振荡。

学术界对 I-VSG 并网稳定性及弱电网适应性的研究十分关注。文献[24]分析了基于风电的 I-VSG 弱电网稳定运行与发电特性。文献[25]分析了由 I-VSG 机组之间的虚拟惯量引起的功率振荡的原理, 并通过合理设计控制参数的方法抑制了系统振荡, 实现了各新能源机组的功率协调控制。文献[26]分析了 I-VSG 同步频率问题以及抑制策略。

目前关于新能源机组并网稳定性的研究, 绝大多数文献均采用小信号分析方法。小信号分析方法主要研究在某一平衡点附近, 新能源机组受到小干扰后的稳定性与动态响应。在大多数文献中, 小信号分析方法一般分为小信号建模与小信号稳定性分析两个部分。

小信号建模是小信号稳定性分析的基础。I-VSG 并网的小信号建模主要关注 I-VSG 并网运行中各种对象的建模方法, 包括 I-VSG 的小信号建模、电网等效建模以及综合 I-VSG 与电网的整体系统的小信号建模。文献[27]建立了使用单台 I-VSG 的小信号模型。在单台 I-VSG 的小信号模型的基础上, 文献[28]建立了考虑电网结构整体系统的小信号模型。文献[29]在文献[30]与文献[31]的基础上, 进一步细化了 I-VSG 的模型, 考虑了电压电流控制器的动态、LCL 滤波器动态等部分。在考虑风电电源侧特性方面, 文献[32]针对双馈风机进行了小信号建模, 文献[33]针对含虚拟惯量与频率控制功能的双馈风机在故障情况下的小信号模型, 建立了更为完整的小信号模型。

在小信号建模的基础上, 小信号稳定性分析主要研究 I-VSG 的控制策略、新能源机组的接口类型以及电网变化等因素对系统小信号稳定性的影响。其主要分析方法是对小信号模型的状态矩阵进行特征值分析。文献[34]通过参与因子分析, 指出电网主导低频模式主要受下垂控制器参数影响, 下垂参数过大可能会导致 I-VSG 并网失稳。文献[35]构建了由多台具有下垂控制的 I-VSG 的下垂系数构成的小干扰安全域, 并通过安全域中某一点距边界的最短距离来评估系统的稳定裕度。文献[36]对比分析了 I-VSG 运行平衡

点变化对系统稳定性分析的影响。

3.2 虚拟同步发电机振荡机理与抑制

I-VSG 通过功角特性, 无需 PLL 环节, 即实现与电网的准确同步, 由于引入了新的状态变量, 例如阻尼系数等, 可能激发其他的振荡模式, 文献[37-39]分析了 I-VSG 可能引发同步频率谐振(SFR)的机理和振荡模式, 提出了振荡抑制策略。

在 dq 坐标系下建立系统小信号模型, 通过推导 I-VSG 的动态全频域功角关系, 阐明 I-VSG 存在的 SFR 现象。分析可知, 全频段的动态功角关系式为

$$H_{\text{ps}}(s) = \frac{\Delta P}{\Delta \delta} = \frac{3}{2} \frac{as^2 + bs + c}{(R + sL)^2 + X^2} \quad (6)$$

其中:

$$\begin{cases} a = \frac{EL^2}{R^2 + X^2}(-EX + UR\sin\delta_0 + UX\cos\delta_0) \\ b = \frac{2ERL}{R^2 + X^2}(-EX + UR\sin\delta_0 + UX\cos\delta_0) \\ c = EUR\sin\delta_0 + EUX\cos\delta_0 \end{cases} \quad (7)$$

式中: $jX = j\omega_s L$, ω_s 为同步旋转频率; U 为被定向到 d 轴的电网电压; E 和 δ_0 分别为变流器桥臂电压幅值和相位; L 和 R 分别为滤波电感和并网线路电阻量。

在稳态时, 电阻值可忽略不计, 由式(6)可以得到:

$$H'_{\text{ps}}(s) = \frac{\Delta P}{\Delta \delta} \approx \frac{EU}{X} \cos\delta_0 \quad (8)$$

式(8)为同步发电机功角关系, 分析同步频率下谐振点, 由式(8)可得到 2 个极点, 位置取决于 R 和 L 的参数值。由于 R 忽略不计, 所以极点的实部近似为零, 只剩虚部, 即极点在虚轴附近。文献[28-30]将 SFR 现象引入到 I-VSG 的运行环路中, 分析其对设备的影响, 引入 SFR 现象的 I-VSG 控制框图如图 7 所示。

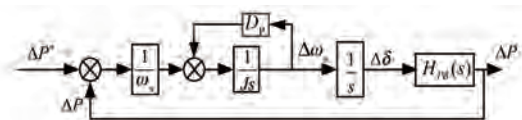


图 7 引入同步频率谐振要素的改进型虚拟同步机控制框图

可以看出, 动态功角 $H_{\text{ps}}(s)$ 在前向通路中起

着关键作用。VSG 的开环传递函数为

$$H_{VSG}(s) = \frac{1}{\omega_s} \frac{1}{s(Js + D_p)} H_{ps}(s) \quad (9)$$

式中: J 为虚拟惯性; D_p 为有功调频系数。

引入一个同步频率谐振点, 设置固定参数, VSG 和 SG 开环传递函数伯德图如图 8 所示, 由图可知, SFR 时相位滞后 180° , 欠阻尼状态下, 谐振峰值超过 0 dB, 激发同步频率振荡, 系统失稳。

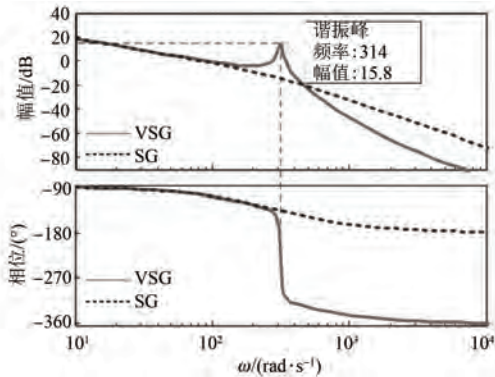


图 8 改进型虚拟同步机和同步机伯德图

由式(9)可知, 谐振幅值的主要影响因素是控制参数、滤波参数及线路电阻。由于电路参数工作在特定状态下, 因此, 为了抑制 SFR 的不利影响, 需要优化影响谐振幅值的控制参数 J 、 D_p 和 R 。在谐振点处, J 、 D_p 和 R 减小, $H_{VSG}(s)$ 幅值增大, 稳定裕度降低, 并由此可能在不恰当的参数设计下激发功率振荡。改变 D_p 对 $|H_{VSG}(j\omega_r)|$ 的影响不明显, 可以通过优化虚拟惯量 J 和电阻 R 进行抑制^[40-43]。

如图 9 可知, I-VSG 虚拟惯量参数增大, 可有效抑制同步频率谐振, 谐振点幅值在 0 dB 以下。

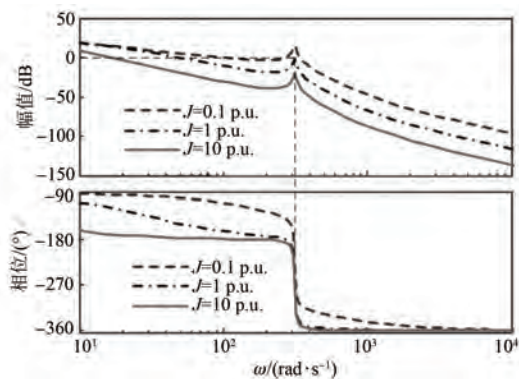


图 9 改进型虚拟同步机不同虚拟惯量伯德图

文献[44]认为从理论分析角度, SFR 与电阻

R 幅值呈正相关, 电阻增大能抑制谐振发生。采用在电流内环控制回路增加虚拟电阻环节的方式, 增强系统阻尼。由图 10 可知, 虚拟电阻对系统同步频率振荡起到正阻尼作用, 抑制谐振点峰值。

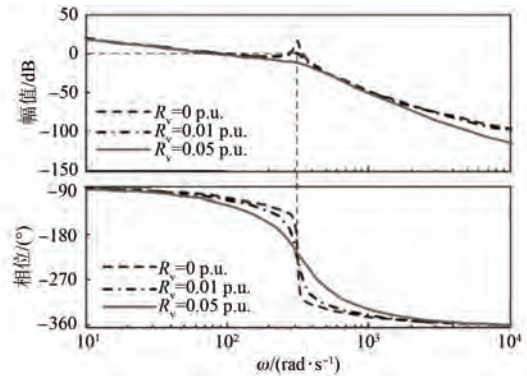


图 10 改进型虚拟同步机不同虚拟电阻伯德图

在微电网环境下, 建立小信号模型, 经推导得到系统五阶特征方程, 改变下垂系数, 通过求解该方程的根轨迹曲线, 来判定系统的稳定性; 在并网运行状态下, 通过建立系统小信号模型, 推导动态全频域功角关系, 阐明 I-VSG 存在 SFR 现象, 存在失稳风险, 可通过增大虚拟惯量 J 或引入虚拟电阻来抑制同步频率振荡。

3.3 新能源 VSG 故障电压穿越技术研究

电网发生故障时新能源发电设备脱网自保会加重系统功率缺额, 恶化电网频率和电压动态。因此, 目前新能源发电设备均具备故障穿越能力。作为并网适应性的重要组成部分, I-VSG 也需具备故障穿越能力。

目前, 针对 I-VSG 故障穿越技术的研究尚处于起步阶段。由于 I-VSG 没有电流控制环节, 因此无法直接对电流进行控制, 故障穿越实现难度较大。文献[45]分析了在电网故障时利用电网电压前馈与有功功率指令调节相结合的方法限制 I-VSG 的内电势, 从而减小故障电流。但实际电网故障时, 电压相位也会发生跳变, 该方法中的电压前馈无法抑制电压相位变化导致的故障电流分量。文献[46]分析了增大 I-VSG 滤波阻抗及限制 I-VSG 内电势与故障点的电压差两种方法对故障电流的抑制效果。结果表明, 增大滤波阻抗可有效抑制故障电流, 但会降低 I-VSG 运行的稳定性; 而限制电压差的方法仅适用于抑制故障稳态

电流,对暂态电流抑制能力较差。文献[47]通过补偿 I-VSG 控制电压的故障分量来减小其等效阻抗上的压降,从而实现降低故障电流的效果,但仅对电网对称故障的情况进行了分析,未讨论不对称故障情况下策略的适用性。

4 虚拟同步发电机稳定分析与控制技术的关键词与研究展望

VSG 技术从控制结构深刻推动新能源机组并网特性和网源协调能力向主动支撑发展,特别是 I-VSG 技术能够有效改善新能源机组的网源协调运行能力,支撑电网维持稳定和故障恢复。因此,有必要进一步探明不同运行工况 I-VSG 群的惯量支撑与一次调频功能对电网频率动态特性的影响规律,分析其功角稳定性,优化电网故障状态下 I-VSG 向系统快速支撑控制方法,提升 VSG 宽频带阻尼的技术,实现 VSG 并网安全稳定运行以及对电网的主动支撑。

4.1 VSG 与同步机组及接入电网的交互作用机制研究

随着 VSG 应用的进一步推广,理解 VSG 与同步机组的动态相互作用,掌握 VSG 特性对高渗透率下新能源电力系统暂态稳定影响的机理具有十分重要的意义。相较于 C-VSG, I-VSG 更充分地模拟了同步机的特性,其并网系统更类似于一个接入了“互动同步风机”的电力系统。目前,关于 I-VSG 小干扰稳定性和暂态稳定性的研究存在以下几方面的不足。首先,缺少分析和讨论不同渗透率对稳定性的影响,特别是,随着 I-VSG 技术的不断发展,有必要研究 I-VSG 占比较大时的稳定性问题及防控措施;其次,现有对多机系统的研究中一般假设每台 I-VSG 的容量、参数均完全一致,而实际 I-VSG 的容量、参数甚至控制策略都有所差异,需要针对不同类型、不同参数 I-VSG 多机并网系统的稳定性展开研究;最后,现有研究中缺少 I-VSG 重要参数的取值标准和选取原则。尤其是虚拟惯量、阻尼系数等 I-VSG 的重要参数,这些参数对系统稳定性有重要影响,需要对 I-VSG 的重要参数给出系统化的整定方法。因此有必要对比分析不同电网强度、渗透率、机组组合情况下,考虑 I-VSG 对系统暂态功角与同步稳定的内涵与机

理的影响,进一步理解 I-VSG 与同步机组、接入电网的交互作用机制,深化 I-VSG 单机特性和系统稳定性相关研究工作。

4.2 支撑电力系统动态稳定性的分析技术研究

电网故障会导致 VSG 机端电压产生大幅波动,在电网故障期间,新能源机组需向电网提供一定的无功电流^[48]。因此,需要进一步研究 VSG 无功电压控制策略对系统动态、暂态稳定性的影响。现有研究对 I-VSG 的无功电压控制进行了不同的策略设计,主要有无功电压下垂控制、无功电压综合控制等^[49-54]。但以上控制方案大多基于稳态运行进行设计与参数设置,对电网故障工况下无功电压控制策略的研究较少。有必要定量分析无功电压控制策略对支撑系统运行和动态稳定性的影响,进一步优化故障期间无功电压支撑策略、切换模式及无功功率指令值的给定等。

5 结 语

综述了研究虚拟同步发电机控制策略和稳定性的相关文献,对虚拟同步发电机并网稳定与控制技术的关键词与研究进行了展望,对全文总结如下:

(1) C-VSG 基于附加频率信号模式,依赖锁相环,无法自组网,存在与常规光伏逆变器类似的失稳模式;V-VSG 适用于并网或孤岛模式,可实现模式无缝切换,但存在有功、无功耦合,运行响应滞后,在大扰动下可能造成系统失稳等问题。

(2) I-VSG 通过附加功率控制和引入电流控制内环,提高新能源发电对电网的支撑性,这种控制策略下的 VSG,增加电流内环对设备进行控制,且都具备虚拟转动惯量,增加了系统总体旋转惯量,从而起到支撑电力系统频率稳定性的作用。

(3) 本文进一步围绕 I-VSG 并网系统稳定性与暂态控制开展分析与综述,旨在总结研究现状,并为 I-VSG 并网系统稳定性、故障恢复和振荡抑制的深入研究提供思路。首先对常用稳定分析方法进行了概述,梳理并总结了 I-VSG 接入对系统稳定的影响。在此基础上,指出了 I-VSG 稳定分析问题、振荡抑制和故障电压穿越的研究重点,深入分析了现有研究的主要成果与存在的不足。最后对 I-VSG 与同步机组及接入电网的交互作用机制、支撑电力系统动态稳定性的分析技术进行了

展望,指出了后续研究的关键问题并提供了可参考的解决思路。

【参考文献】

- [1] 丁明, 杨向真, 苏建徽. 基于虚拟同步发电机思想的微电网逆变电源控制策略[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(8): 89-93.
- [2] 李东东, 刘庆飞. 虚拟同步发电机频率稳定性分析[J]. 电机与控制应用, 2018, 45(6): 40-45.
- [3] 朱慧敏, 苑舜, 李春来. 含储能环节的光伏电站虚拟同步发电机控制策略与分析[J]. 电测与仪表, 2023, 60(5): 45-50.
- [4] 李岳. 基于虚拟同步发电机的微电网控制策略的研究[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2014.
- [5] 杨向真. 微网逆变器及其协调控制策略研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2011.
- [6] 毛福斌. 微网逆变器的虚拟同步发电机控制策略研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2016.
- [7] 王克. 基于虚拟同步发电机的风力发电系统接口特性的研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2015.
- [8] 何江涛, 张代润. 电压暂降时并网逆变器电流的VSG抑制技术研究[J]. 电测与仪表, 2021, 58(4): 24-29.
- [9] 杜威, 姜齐荣, 陈蛟瑞. 微电网电源的虚拟惯性频率控制策略[J]. 电力系统自化, 2011, 35(23): 26-31.
- [10] 孟建辉, 石新春, 王毅, 等. 改善微电网频率稳定性的分布式逆变电源控制策略[J]. 电工技术学报, 2015, 30(4): 70-79.
- [11] 肖朝霞. 微网控制及运行特性分析[D]. 天津: 天津大学, 2008.
- [12] 程之隆, 李岚, 吴雷, 等. 基于VSG的并网型直驱永磁风力发电的频率调节[J]. 电测与仪表, 2020, 57(18): 103-109.
- [13] 吕志鹏, 郭育华, 刘岚, 等. 基于虚拟同步发电机的微网逆变器设计[J]. 电力电子技术, 2016, 50(12): 106-108.
- [14] 耿昊翔, 王维俊, 唐帅, 等. 基于无锁相环的虚拟同步发电机离并网切换控制策略研究[J]. 电机与控制应用, 2021, 48(9): 90-95.
- [15] ARCO S D, SUUL J A, FOSSO O B. A virtual synchronous machine implementation for distributed control of power converters in smart grids [J]. Electric Power Systems Research, 2015, 122: 180-197.
- [16] 吕志鹏, 盛万兴, 钟庆昌, 等. 虚拟同步发电机及其在微电网中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(16): 2591-2603.
- [17] 杜燕, 苏建徽, 张榴晨, 等. 一种模式自适应的微网调频控制方法[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(19): 67-75.
- [18] 霍现旭, 黄鑫, 汪可友, 等. 基于虚拟同步机的微电网频率稳定控制研究[J]. 现代电力, 2019, 36(1): 45-52.
- [19] 杨森, 杜文娟, 王旭斌, 等. 风火—需求侧响应协调频率控制方法[J]. 电网技术, 2017, 41(3): 845-853.
- [20] WANG X F, BLAABJERG F, LISERRE M, et al. An active damper for stabilizing power-electronics-based AC systems[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(7): 3318-3329.
- [21] WANG X F, BLAABJERG F, WU W M. Modeling and analysis of harmonic stability in an AC power-electronics-based power system [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(12): 6421-6432.
- [22] CESPEDES M, SUN J. Impedance modeling and analysis of grid-connected voltage-source converters [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(3): 1254-1261.
- [23] WEN B, BOROYEVICH D, MATTAVELLI P, et al. Influence of phase-locked loop on input admittance of three-phase voltage-source converters [C] // 2013 Proceedings of the 28th Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2013.
- [24] DONG D, WEN B, MATTAVELLI P, et al. Grid-synchronization modeling and its stability analysis for multi-paralleled three-phase inverter systems [C] // 2013 Proceedings of the 28th Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2013.
- [25] 张琛, 蔡旭, 李征. 具有自主电网同步与弱网稳定运行能力的双馈风电机组控制方法[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(2): 476-485.
- [26] WANG S, HU J, YUAN X. DFIG-based wind turbines with virtual synchronous control: inertia support in weak grid [C] // 2015 Proc. Power & Energy Society General Meeting (PESGM), 2015.
- [27] 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): 381-390.
- [28] LIU J, MIURA Y, BEVRANI H, et al. Enhanced virtual synchronous generator control for parallel

- inverters in microgrids [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2016, 31(5): 3600-3611.
- [29] 罗澍忻, 韩应生, 余浩, 等. 构网型控制在提升高比例新能源并网系统振荡稳定性中的应用[J]. 南方电网技术, 2023, 17(5): 39-48.
- [30] POGAKU N, PRODANOVIC M, GREEN T C. Modeling, analysis and testing of autonomous operation of an inverter-based microgrid. IEEE Transactions on Power Electronics, 2007, 22(2): 613-625.
- [31] 周镇, 孙近文, 曾凡涛, 等. 考虑风机接入的电力系统小信号稳定优化控制[J]. 电工技术学报, 2014, 29(1): 424-430.
- [32] 孙丽玲, 胡兰青. 双馈风力发电机的调频策略及机组定子故障下的弱电网稳定性研究[J]. 电网技术, 2018, 42(2): 509-516.
- [33] DIAZ G, GONZALEZ M C, GOMEZ A J, et al. Scheduling of droop coefficients for frequency and voltage regulation in isolated microgrids [J]. IEEE Transactions of Power Systems, 2010, 25(1): 489-496.
- [34] WU X Y, SHEN C, ZHAO M, et al. Small signal security region of droop coefficients in autonomous microgrids [C] // 2014 IEEE Power Energy Society General Meeting, 2014.
- [35] ALIPOOR J, MIURA Y, ISE T. Voltage sag ride-through performance of virtual synchronous generator [C] // 2014 Proceeding of 2014 International Power Electronics Conference, 2014.
- [36] 尚磊, 胡家兵, 袁小明, 等. 电网对称故障下虚拟同步发电机建模与改进控制[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(2): 403-411.
- [37] 邹培根, 孟建辉, 王毅, 等. 灵活虚拟同步机主要控制参数对系统频率稳定性的影响分析[J]. 高电压技术, 2018, 44(4): 1335-1342.
- [38] ASHABANI M, MOHAMED Y A-R I. Novel comprehensive control framework for incorporating VSCs to smart power grids using bidirectional synchronous-VSC [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 29(2): 943-957.
- [39] 范亚楠, 刘天羽, 江秀臣, 等. 基于最优阻尼比虚拟同步发电机的优化控制策略[J]. 电测与仪表, 2020, 57(7): 60-67.
- [40] 王继磊, 张兴, 朱乔华, 等. 虚拟同步发电机暂态稳定性分析与控制策略[J]. 电机与控制学报, 2022, 26(12): 28-37.
- [41] 于晶荣, 孙文, 于佳琪, 等. 基于惯性自适应的并网逆变器虚拟同步发电机控制[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(4): 137-144.
- [42] 王光宇, 付立军, 胡祺, 等. 计及电压环影响的虚拟同步发电机低频振荡阻尼分析与控制[J]. 电力系统自动化, 2022, 45(14): 177-184.
- [43] 涂春鸣, 谢伟杰, 肖凡, 等. 多虚拟同步发电机并联系统控制参数对稳定性的影响分析[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(15): 77-86.
- [44] 程学坤, 刘辉, 田云峰, 等. 基于虚拟同步控制的双馈风电并网系统暂态功角稳定研究综述与展望[J]. 电网技术, 2021, 45(2): 518-525.
- [45] 袁敞, 毕嘉, 亮陈虎, 等. 多虚拟同步机系统的自适应滑模变结构控制方法[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(8): 26-36.
- [46] 李智, 张中华, 刘辉, 等. LCL型储能虚拟同步发电机谐波谐振特性分析与抑制策略[J]. 太阳能学报, 2020, 41(10): 101-108.
- [47] 张华强, 牟晨东, 赵玫, 等. 基于强化学习的多光储虚拟同步机频率协调控制策略[J]. 电气传动, 2021, 51(19): 36-42.
- [48] 王淋, 巨云涛, 吴文传, 等. 面向频率稳定提升的虚拟同步化微电网惯量阻尼参数优化设计[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(13): 4479-4489.
- [49] 孙大卫, 刘辉, 高舜安, 等. 电流控制型虚拟同步发电机的小信号建模与稳定性分析[J]. 电网技术, 2018, 42(9): 2983-2991.
- [50] 王金华, 王宇翔, 顾云杰, 等. 基于虚拟同步控制的双馈风电并网系统暂态功角稳定研究综述与展望[J]. 电网技术, 2021, 45(2): 518-525.
- [51] 张中华, 李智, 宋鹏, 等. LC型储能虚拟同步发电机谐波谐振机理与抑制策略研究[J]. 可再生能源, 2018, 36(12): 1842-1848.
- [52] 王志忠. 风电—储能联合系统的功率预测及平滑调节[D]. 深圳: 深圳大学, 2016.
- [53] 巩宇, 王杨, 李智, 等. 光伏虚拟同步发电机工程应用效果分析及优化[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(9): 149-156.
- [54] 曾正, 邵伟华, 冉立, 等. 虚拟同步发电机的模型及储能单元优化配置[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(13): 22-31.