DOI:10.14188/j.1671-8844.2026.0024 文章编号:1671-8844(XXXX)XX-0001-13

基于功角反馈参考功率重构的含虚拟电阻VSG暂态稳定增强方法

石新宇,龚庆武

(武汉大学电气与自动化学院,湖北 武汉 430072)

摘要: 在呈高感性的高压电网中,虚拟同步机控制(Virtual Synchronous Generator, VSG)具有同步振荡风险,通常需引入虚拟电阻以增强系统阻尼,但研究表明这会恶化系统的暂态稳定性。针对这一问题,本文首先建立了含虚拟电阻补偿的VSG并网系统模型,应用等面积法分析了故障下虚拟电阻功率的影响,揭示了系统暂态稳定性恶化的机理。在此基础上,提出了一种基于功角反馈的参考功率修正控制策略的暂态稳定性增强策略。该方法通过修改功率参考值对虚拟电阻功率进行过补偿,从而重构了等效参考功率曲线功角特性,以保障故障期间系统具有稳定平衡点和充足的减速面积。此外,为了提高对严重故障的适应能力,引入自适应虚拟限流阻抗以限制故障电流,并考虑故障恢复给出阻感比设计约束。仿真结果表明,在轻度、中度和重度故障下,本文所提方法均能有效提升系统暂态稳定性。

关键词: 虚拟同步机;同步振荡;虚拟电阻;暂态稳定性

中图分类号: TM 712 **文献标志码:** A

A power-angle feedback based reference power reshaping strategy for transient stability enhancement of VSG with virtual resistance under grid voltage sag

SHI Xinyu, GONG Qingwu

(School of Electrical Engineering and Automation, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: In high-voltage power grids with strong inductive characteristics, virtual synchronous generator (VSG) control is prone to synchronous-frequency oscillation. To address this, virtual resistance is commonly introduced to enhance system damping. However, existing studies indicate that this approach can degrade transient stability. To resolve this conflict, this paper first establishes a model of a grid-connected VSG system incorporating virtual-resistance compensation. Using the equal-area criterion, it analyses the impact of virtual resistance power during faults, thereby elucidating the mechanism by which virtual resistance undermines transient stability. Building on this analysis, a transient stability enhancement strategy based on a power-angle feedback reference-power correction is proposed. By over-compensating the virtual resistance power, the method reshapes the power-angle characteristic curve of the equivalent reference power to ensure a stable

收稿日期: 2026-02-27

作者简介: 石新宇(2001-),男,硕士研究生,主要从事构网型变流器控制研究,E-mail: 2731337134@qq.com。

通信作者: 龚庆武(1967-),男,教授,博士生导师,主要从事电力系统运行与控制研究,E-mail: qwgong@whu.edu.cn。

基金项目: 国家重点研发计划项目(编号:2026ZD0811500)

本文引用格式: 石新宇,龚庆武.基于功角反馈参考功率重构的含虚拟电阻VSG暂态稳定增强方法[J].武汉大学学报(工学版),XXXX,XX(XX):1-13.

Citation: SHI Xinyu, GONG Qingwu. A power-angle feedback based reference power reshaping strategy for transient stability enhancement of VSG with virtual resistance under grid voltage sag[J]. Engineering Journal of Wuhan University, XXXX, XX(XX): 1-13.

equilibrium point and sufficient deceleration area during grid faults. Furthermore, to enhance adaptability to severe faults, an adaptive virtual current-limiting impedance is introduced to suppress fault current, and a constraint on its resistance-to-inductance ratio is provided to guarantee post-fault system recovery. Simulation results under mild, moderate, and severe fault conditions demonstrate that the proposed method effectively improves the system′s transient stability.

Key words: virtual synchronous generator (VSG); synchronous resonance; virtual resistance; transient synchronization stability

在“双碳”战略目标的推动下,以新能源为主体的新型电力系统快速发展。大量清洁能源通过电力电子变流器接入电网,逐渐取代传统同步发电机,导致系统转动惯量与系统强度持续下降,对频率与电压的稳定支撑构成严峻挑战。在此背景下,以虚拟同步发电机(Virtual Synchronous Generator, VSG)控制为代表的构网型控制策略,成为一种有效的变流器并网解决方案。VSG控制通过模拟同步发电机转子运动特性,为系统提供所需的惯量与阻尼,实现以功率同步方式并网运行,并能在弱电网中实现稳定的功率输出。

然而,功率同步型控制存在一个阻尼由电网阻抗参数决定的同步频率振荡模式,具有潜在的同步振荡风险,这在呈高感性的高压电网中尤其突出[1-2]。为抑制同步振荡,通常在控制环路中引入虚拟电阻[3],以改善极点分布。该方法能在控制层面提供必要的阻尼,且不产生额外的功率损耗。此外,虚拟电阻还广泛应用于次同步振荡抑制[4]、高频振荡抑制[5]与过电流限制[6]等方面,显著提升了VSG并网系统的静态稳定性。目前,围绕其作用机理、参数设计与结构优化已形成较为丰富的研究成果[7]。

尽管虚拟电阻存在诸多优点,但研究表明其可能对系统的暂态稳定性产生不利影响。文献[8]指出虚拟电阻会减小VSG并网系统稳定平衡点的吸引域,增大加速失稳风险。文献[9]的分析也表明,引入虚拟电阻会减小故障极限切除角,进而缩短极限切除时间。暂态稳定性是大扰动下VSG与电网保持同步的能力,对新能源安全稳定并网至关重要。为了提升系统的暂态稳定性,学者们从不同角度逐步开展研究。文献[10]构造了VSG并网系统的李雅普诺夫函数,在此基础上估计了系统的吸引域和暂态稳定裕度;文献[11]将VSG并网系统改写为端口受控哈密顿系统形式,并以此设计了状态变量反馈,在电压暂降期间主动修改参考功率以增强功角稳定性;文献[12]将VSG频率反馈到无功控制环中,同时增强了故障时系统的同步稳定性与频率稳定性。然而,以上研究均忽视了虚拟电阻对系统暂态稳定性的影响。

针对这一局限,部分学者进行了深入研究。文献[13]提出在故障期间以虚拟有功功率替代实际功率作为反馈,引入到VSG的有功环中,从控制上完全消除虚拟电阻的影响,延迟了故障临界切除时间;文献[14]将VSG端口电压降作为反馈调节有功功率参考值,以建立故障后的稳态平衡点,并基于虚拟电阻进行了参数设计;在此基础上,文献[15]提出了有功指令和无功指令的联合调节方案,同时兼顾了故障下变流器容量的利用。然而,上述研究均基于变流器不触发限流的假设,这意味着其仅适用于轻度故障场景,在电网深度电压跌落情况下的有效性还有待验证。此外,虽存在如模式切换控制[16,17]、功角保持控制[18,19]等不受虚拟电阻制约的暂态稳定提升策略,但前者需要附加锁相环且破坏了VSG的构网特性,而后者依赖快速准确的故障电压量测,难以在实际中应用。综上所述,含虚拟电阻的VSG并网系统在故障下的暂态稳定问题尚未得到有效解决,仍需进一步研究。

针对上述问题,本文聚焦于含虚拟电阻的VSG并网系统,分析其在电网电压跌落下的暂态响应过程,旨在提升VSG在故障下、尤其是严重故障场景中的暂态稳定性。首先通过小信号模型阐明虚拟电阻对抑制同步振荡的必要性,并分析其对暂态稳定性的不利影响,揭示其恶化机理:虚拟电阻功率的引入等效改变了系统的功率平衡关系,导致故障中稳定平衡点偏移甚至消失。在此基础上,以重构稳定平衡点为目标,提出一种基于功角反馈的参考功率修正控制策略,该策略能根据功角大小主动修正参考功率,以恢复故障下的功率平衡。相比于已有方法,所提策略同时考虑了变流器限流约束,在严重故障下具有更好的适应性。

1 构网型逆变器并网系统模型

采用构网控制的逆变器并网系统拓扑结构及

控制策略如图1所示，图中，R_g、L_g分别为线路等效电阻和线路等效电感；L_f、C_f分别为滤波电感和滤波电容；U_g、U_o、I_o分别为电网电压、逆变器输出电压、输出电流；P、Q分别为逆变器输出的有功和无功功率。考虑到风光减载策略或储能设备能稳定电压[20]，变流器直流侧动态被忽略，用恒定电压U_{dc}表示。

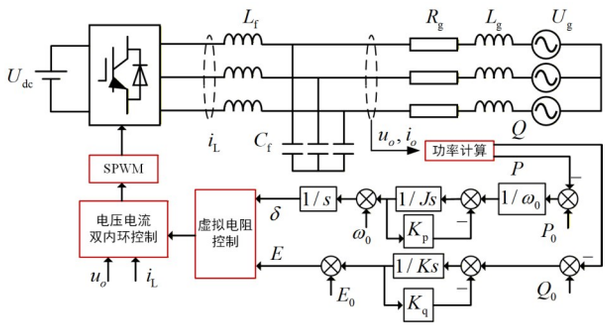


图1　VSG并网系统结构及控制策略拓扑图

Fig.1　Topology of VSG system and its control.

变流器的控制系统主要由外环功率控制和内环电压-电流控制两部分组成。外环功率控制通过检测输出电压与电流，计算出有功功率P和无功功率Q，并据此生成内电势的相角和幅值，合成内电势的参考向量。内电势再经过内环电压-电流控制和SPWM调制最终得到变流器的控制信号。此外，虚拟电阻常被引入抑制同步振荡。

1.1　VSG控制策略

变流器的有功环采用虚拟同步机控制，模拟同步机的惯性和阻尼响应，控制方程为：

$$\begin{cases} \dfrac{\mathrm{d}\delta}{\mathrm{d}t}=\omega-\omega_0 \\ J\dfrac{\mathrm{d}\omega}{\mathrm{d}t}=\dfrac{P_0-P}{\omega_0}-K_p(\omega-\omega_0) \end{cases} \tag{1}$$

式中：δ为VSG内电势相角；ω、ω_0分别为VSG虚拟角速度及额定角速度；J为虚拟转动惯量；K_p为有功阻尼系数；P_0为有功功率参考值。

无功环通过调节内电势幅值控制变流器输出的无功功率，控制方程为：

$$K\frac{\mathrm{d}E}{\mathrm{d}t}=Q_0-Q-K_q(E-E_0) \tag{2}$$

式中：K为电压积分系数；E、E_0分别为内电势幅值和额定值；Q_0、Q分别为参考无功功率和输出无功功率；K_q为无功下垂系数。

VSG内环采用电压电流双闭环控制，通过交叉解耦，实现电容电压对内电势的快速追踪。由于带宽远大于外环功率控制带宽，在暂态分析中，内环动态与滤波器暂态过程可被忽略。

1.2　虚拟电阻阻尼环节

为分析同步振荡机理并引出虚拟电阻阻尼的必要性，首先建立VSG并网系统的等效电路模型如图2所示，图中变流器用幅值为E、相角为δ的电压源表示。为简化分析，在本文中电网电压相角被设为零，作为系统的相角基准。

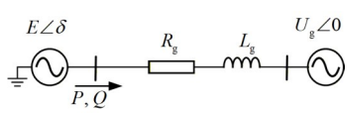


图2　等效电路模型

Fig.2　Equivalent circuit.

在不考虑VSG内部控制环路的前提下，推导输出有功功率对功角的开环传递函数$G_P(s)$与无功功率对内电势的开环传递函数$G_Q(s)$。根据瞬时功率理论，VSG的输出功率为：

$$\begin{cases} P=\dfrac{3}{2}(u_d i_d+u_q i_q) \\ Q=\dfrac{3}{2}(u_q i_d-u_d i_q) \end{cases} \tag{3}$$

式中：u_d、u_q和i_d、i_q分别为变流器输出在dq坐标系下的电压、电流投影。定义d轴与电网电压矢量方向一致。因此u_d、u_q分别满足：$u_d=E\cos\delta$、$u_q=E\sin\delta$。

等效电路的动态方程为：

$$\begin{cases} u_d=R_g i_d+sL_g i_d-\omega_0 L_g i_q+U_g \\ u_q=R_g i_q+sL_g i_q+\omega_0 L_g i_d \end{cases} \tag{4}$$

按照文献[14]中小信号模型构建方法，将式(3)-(4)在稳定点处线性化，改写为小信号形式，联立并将稳态工作点代入，最终可解得$G_P(s)$、$G_Q(s)$分别为：

$$\begin{cases} G_P(s)=\dfrac{\hat{P}}{\hat{\delta}}=\dfrac{1.5EU_g(R_g\sin\delta_0+\omega_0 L_g\cos\delta_0)}{L_g^2 s^2+2R_g L_g s+R_g^2+\omega_0^2 L_g^2} \\ G_Q(s)=\dfrac{\hat{Q}}{\hat{E}}=\dfrac{1.5[\omega_0 L_g(2E-U_g\cos\delta_0)-R_g U_g\sin\delta_0]}{L_g^2 s^2+2R_g L_g s+R_g^2+\omega_0^2 L_g^2} \end{cases} \tag{5}$$

式中：$\hat{P}$、$\hat{Q}$、$\hat{\delta}$、$\hat{E}$分别为变流器有功功率、无功功率、相角、内电势的小信号；δ_0为功角稳态值。

传递函数$G_P(s)$、$G_Q(s)$均为二阶系统,具有相同的一对共轭极点,即

$$p_{1,2}=-R_g/L_g\pm j\omega_0 \tag{6}$$

该极点的实部$-R_g/L_g$决定了系统的固有阻尼。在高电压等级电网中,线路呈高感性($\omega_g L_g\gg R_g$),导致该实部绝对值很小,即系统固有的正电阻阻尼R_g严重不足,使得极点非常靠近虚轴,同步振荡模式难以衰减。更为严峻的是,研究表明,VSG控制环节本身可能在工频附近引入负阻尼特性,进一步降低了系统的等效电阻,从而显著增大了同步失稳风险[21-23]。

为提升并网系统的静态稳定性,抑制同步振荡,必须引入虚拟电阻增加系统的等效阻尼。

2 虚拟电阻对暂态稳定的影响分析

虚拟电阻能够增强系统静态稳定性,但在电网电压跌落下,其对系统暂态稳定的影响需进一步分析。本节首先基于等面积准则定性分析其不利影响,然后通过相图法对理论进行验证。

2.1 考虑虚拟电阻影响的暂态稳定机理

计及虚拟电阻控制的VSG输出有功功率P可表示为:

$$P=1.5[E^2G-EU_g(B\sin\delta+G\cos\delta)]-1.5R_v\frac{E^2+U_g^2-2EU_g\cos\delta}{R_{eq}^2+X_g^2} \tag{7}$$

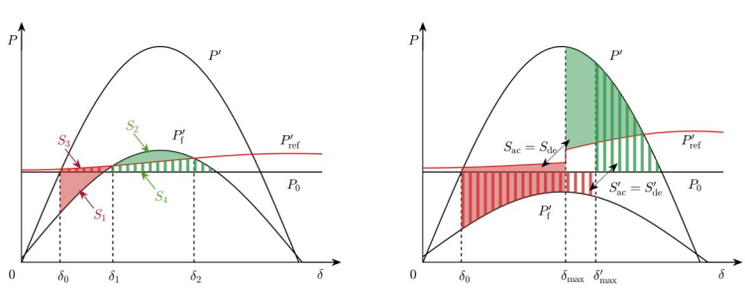
式中:$R_{eq}=R_v+R_g$表示系统总等效电阻,经虚拟电阻补偿后,R_{eq}满足VSG并网系统静态稳定的要求;$G=R_{eq}/(R_{eq}^2+X_g^2)$表示系统等效电导;$B=-X_g/(R_{eq}^2+X_g^2)$表示系统等效电纳。

在式(7)中输出有功功率由两项构成:前者为电路固有功率,由电压矢量与等效电路参数决定;后者为虚拟电阻功率,则由虚拟电阻替代实际电网电阻所引入,代表电流在虚拟电阻上产生的功率,该功率实际并未输出。相较于具备足量电阻的系统,采用虚拟电阻补偿的系统其输出功率有所降低,且降幅与电网电压及功角有关。尤其在电网电压跌落时,功角的暂态变化会显著影响虚拟电阻功率,故必须单独考虑其作用。将虚拟电阻功率归算到功率参考值后,重新定义等值参考功率P_{ref}'及电路固有功率P'分别如式(8)、(9)所示:

$$P_{ref}'=P_0+1.5R_v\frac{E^2+U_g^2-2EU_g\cos\delta}{R_{eq}^2+X_g^2} \tag{8}$$

$$P'=1.5[E^2G-EU_g(B\sin\delta+G\cos\delta)] \tag{9}$$

根据式(8)和式(9)绘制功角曲线如图3所示,图中曲线P'、P_f'分别表示正常运行和电压跌落下的电路固有功率曲线,曲线P_{ref}'表示虚拟电阻作用下的等值参考功率曲线,曲线P_0则表示相同等值参数下无虚拟电阻作用的参考功率曲线。图3(a)和3(b)分别为不考虑故障恢复和考虑故障恢复的情况。



(a)不考虑故障恢复　　(b)考虑故障恢复

图3 电压跌落下VSG的功角曲线

Fig.3 $P-\delta$curve of the VSG under grid voltage sag.

不考虑故障恢复时的功角曲线如图3(a)所示,δ_0为系统的稳态功角。当电网电压突然跌落,系统运行曲线由P'突变为P_f',由于此时变流器输入等值参考功率P_{ref}'大于输出功率P_f',在VSG控制下虚拟转子加速,功角逐渐增大。当功角增大至δ_1时,系统达到故障后的平衡点,但在惯性的作用下,VSG相角速度ω仍大于电网角速度ω_g,功角继续增大,此后由于输入等值参考功率P_{ref}'小于输出功率P_f',虚拟转子逐渐减速。若虚拟转子在到达不稳定平衡点δ_2前减速为同步转速,即加速面积S_1小于最大减速面积S_2,系统将在阻尼的作用下,稳定在故障稳态平衡点δ_1;反之,若虚拟转子在功角达到δ_2后速度仍大于ω_g,即$S_1>S_2$,VSG将重新加速,系统周期性失稳。因此系统暂态稳定性取决于加速面积S_1和最大减速面积S_2的大小,虚拟电阻补偿使得加速面积净增S_3,最大减速面积净减S_4,这一变化

表明其暂态稳定性相较于电网阻尼充足的等参系统有所恶化。

若电网电压跌落程度较深，故障下系统没有平衡点，则必须及时切除故障。考虑故障恢复的功角曲线如图3(b)所示，图中δ_{max}为故障极限切除角。在$\delta=\delta_{max}$时刻切除故障，满足加速面积S_{ac}与最大减速面积S_{de}相等，系统处于临界稳定状态。在虚拟电阻作用下，系统等值参考功率$P_{ref}'>P_0$，与电网阻尼充足的等参系统相比，极限切除角由δ_{max}'减小至δ_{max}，也表明暂态稳定性有所恶化。

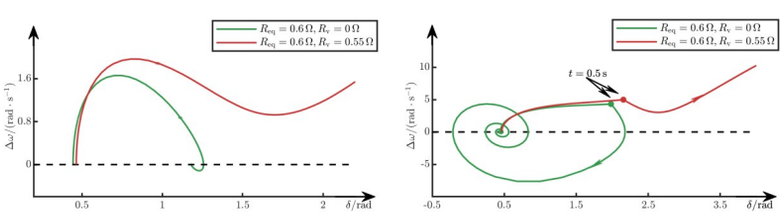
上述分析指出，虚拟电阻补偿抬高了VSG并网系统的等值参考功率，致使电网故障下的加速面积增大、最大减速面积减小，其暂态稳定性因而逊于电网阻尼充足的等值系统。为抵消虚拟电阻的这一不利影响，在故障期间调整参考功率是一有效途径。据此，本文提出了相应改进控制策略，具体方法在后续展开说明。

2.2　基于相图法的分析验证

为了进一步验证虚拟电阻对系统暂态稳定的不利影响，本节采用相图法分析故障后系统轨迹。同时计及无功环的控制作用，联立式(1)、式(2)和式(3)，选取状态变量$x_1=\delta$，$x_2=\omega-\omega_0$，$x_3=E-E_0$，建立系统三阶状态方程如下，即

$$\begin{bmatrix}\dot{x}_1\\ \dot{x}_2\\ \dot{x}_3\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}x_2\\ \dfrac{P_0-P(x_1,x_3)}{J\omega_0}-\dfrac{D}{J}x_2\\ \dfrac{Q_0-Q(x_1,x_3)}{K}-\dfrac{1}{K}x_3\end{bmatrix}\tag{10}$$

求解该状态方程，据此绘制电网电压跌落下VSG的相平面图如图4所示，所用系统参数及控制参数与第4章中仿真模型一致。蓝色轨迹对应于电网电阻充足的条件($R_g=0.6\Omega$，$R_v=0\Omega$)，红色轨迹则对应于电网电阻不足、由虚拟电阻补偿的条件($R_g=0.05\Omega$，$R_v=0.55\Omega$)。



(a)U_{gf} = 0.4p.u.　　(b)U_{gf} = 0.2p.u.

图4　电压跌落下VSG的相平面图

Fig.4　phase portrait of the VSG under grid voltage sag.

电网电压跌落至0.4 p.u.时，相轨迹如图4(a)所示。此情景下故障程度不深，输出功率与参考功率仍有交点，即对应图3(a)情况。由于具备充足的减速面积，纯电网电阻系统在故障后能够顺利减速，振荡后达到新的稳定平衡点。对于虚拟电阻补偿的系统，增大的加速面积导致更大的暂态角速度，同时减速面积的不足使其无法在不稳定平衡点前将速度降至零，导致系统轨迹发散失稳。

电网电压跌落至0.2 p.u.的时，相轨迹如图4(b)所示。此情景为深度故障，输出功率与参控功率无交点，即对应图3(b)情况。系统在0.5 s时切除故障，电阻充足系统功角未超过其极限切除角δ_{max}'，系统轨迹能够收敛到稳定平衡点。而虚拟电阻补偿系统由于加速面积增大，故障切除时功角更大；同时，其更小的极限切除角(第2.1节)进一步压缩了稳定裕度。这两方面因素共同导致在0.5 s切除故障后，系统轨迹发散失稳。相轨迹与理论分析结论一致，均表明虚拟电阻的引入会恶化VSG并网系统的暂态稳定性。

3　基于功角反馈的参考功率修正控制策略

前述分析指出，VSG并网系统暂态失稳的根源在于故障期间的功率失衡，而虚拟电阻加剧了该功率失衡。考虑到虚拟电阻会加剧功率失衡，本节提出一种基于功角反馈的参考功率修正控制策略。该策略旨在通过动态修正功率参考值以建立故障期间的稳定平衡点，此外自适应暂态虚拟阻抗被引入以限制故障电流。

3.1　基于功角反馈的参考功率修正控制

由式(9)可知，在电网电压跌落下，虚拟电阻在等值参考功率中产生功率参考增量ΔP，即

$$\Delta P=1.5R_v\frac{E^2+U_{gf}^2-2EU_{gf}\cos\delta}{R_{eq}^2+X_g^2}=1.5R_vI_f^2\tag{11}$$

式中：U_{gf}表示故障期间电网电压；I_f表示故障期间

变流器输出电流。

据此,一个直接的思路是:在故障期间将有功功率参考值修正为$P_{\mathrm{ref}}^{*(1)}=P_0-\Delta P$,以抵消虚拟电阻引入的功率参考增量,从而使系统暂态功角特性等同于电网电阻充足的系统。然而,根据第2.1节分析,在深度故障下,即使电网电阻充足系统也可能因平衡点消失、故障清除不及时而暂态失稳。为应对严重故障,必须对参考功率进行进一步修正。

显然故障深度是影响系统暂态稳定的重要因素,但远方测量的故障电压U_{gf}受制于通信时延或丢包,其实时性与可靠性无法保证,相关研究表明实际控制系统应仅依赖本地测量[24]。因此,考虑在任意电压跌落时,故障电流I_{f}应满足:

$$I_{\mathrm{f}}=\sqrt{\frac{E^2+U_{\mathrm{gf}}^2-2EU_{\mathrm{gf}}\cos\delta}{R_{\mathrm{eq}}^2+X_{\mathrm{g}}^2}}\leqslant\begin{cases}\dfrac{E}{\sqrt{R_{\mathrm{eq}}^2+X_{\mathrm{g}}^2}}, & \delta\in[0,\pi/3)\\ \dfrac{E\sqrt{2-2\cos\delta}}{\sqrt{R_{\mathrm{eq}}^2+X_{\mathrm{g}}^2}}, & \delta\in[\pi/3,\pi]\end{cases}\tag{12}$$

将式(13)代入式(12),则由虚拟电阻产生的功率增量可表示为:

$$\Delta P=1.5R_{\mathrm{v}}I_{\mathrm{f}}^2\leqslant\begin{cases}\dfrac{1.5R_{\mathrm{v}}E^2}{R_{\mathrm{eq}}^2+X_{\mathrm{g}}^2}, & \delta\in[0,\pi/3)\\ \dfrac{3R_{\mathrm{v}}E^2(1-\cos\delta)}{R_{\mathrm{eq}}^2+X_{\mathrm{g}}^2}, & \delta\in[\pi/3,\pi]\end{cases}\tag{13}$$

将不等式右端记为$\Delta P'$,则有$\Delta P\leqslant\Delta P'$。若以$\Delta P'$替代由故障电流$I_{\mathrm{f}}$计算得到的$\Delta P$作为反馈量,则可将故障期间的参考功率修正为$P_{\mathrm{ref}}^{*(2)}=P_0-\Delta P'$。将修正值代入(9)中,可得到修正后等值参考功率为:

$$P_{\mathrm{ref}}^{'(i)}=P_{\mathrm{ref}}^{*(i)}+\Delta P,\quad i=1,2,3\tag{14}$$

式中,$i=1,2$分别对应前文所述方案,$i=3$则对应本文最终提出的修正方案。

根据式(9)和式(14),可绘制参考功率修正后的功角曲线如图5所示。未经补偿时等值参考功率P_{ref}'呈“上弯”特性,这正是第2.1节中暂态稳定性恶化的原因。当采用基于I_{f}的ΔP反馈时,功率补偿恰好抵消虚拟电阻影响,使$P_{\mathrm{ref}}^{'(1)}$恒定为P_0,暂态特性等同于电阻充足系统。而采用$\Delta P'$计算反馈所得的$P_{\mathrm{ref}}^{'(2)}$提供了过补偿,使得修正后的等值参考功率呈现“下弯”特性,从而在一定程度上提升系统的暂态稳定性。

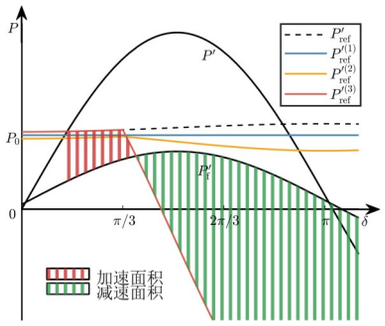


图5 参考功率修正后的功角曲线

Fig.5 $P-\delta$curve with reference power correction.

若能进一步增强等值参考功率的“下弯”特性,确保系统在故障期间始终具有稳态平衡点且具备充足的减速面积,即可保证VSG并网系统的暂态稳定性。基于该思想,设计基于功角反馈的功率修正量$\Delta P_{\mathrm{design}}$如下,即

$$\Delta P_{\mathrm{design}}=\begin{cases}0, & \delta\in[0,\pi/3)\\ \dfrac{kE_0^2(\cos(\pi/3)-\cos\delta)}{R_{\mathrm{eq}}^2+X_{\mathrm{g}}^2}, & \delta\in[\pi/3,\pi]\end{cases}\tag{15}$$

式中:k为可调系数,用于调节“下弯”特性幅度。经此修正后参考功率为$P_{\mathrm{ref}}^{*(3)}=P_0-\Delta P_{\mathrm{design}}$。

所设计的功率修正量$\Delta P_{\mathrm{design}}$在$\Delta P'$的基础上进行了如下针对性改进:(1)在$\delta\in[0,\pi/3)$区间将修正值置零,旨在确保改进控制策略不影响系统稳态平衡点,从而实现故障穿越控制与常规控制的平滑切换。(2)调整$\delta\in(\pi/3,\pi]$分段在$\pi/3$处的函数值,以保证修正量在整个定义域内连续。(3)引入可调系数k,通过合理选取k的取值,使系统具有充分的“下弯”特性,进而确保故障期间系统存在稳态平衡点与充足的减速面积。由图5可见,修正后的等值参考功率$P_{\mathrm{ref}}^{'(3)}$不仅呈现“下弯”特性与故障后系统曲线相交,更在功角较大时转为负值。这保证了即使在深度故障导致功率外送困难时,系统仍可通过充足的减速面积维持稳定。

参考功率修正控制保证了系统的暂态稳定性,但由式(12)可知,故障期间可能产生过大的故障电流。鉴于变流设备耐受过电流能力弱,必须对故障电流进行限制。为此,引入自适应虚拟限流阻抗,其表达式为

$$\begin{cases}R_{\mathrm{lc}}=\max\big(m(I-I_{\mathrm{th}}),0\big)\\ X_{\mathrm{lc}}=\sigma\cdot R_{\mathrm{lc}}\end{cases}\tag{16}$$

式中:X_{lc}表示虚拟限流电抗;R_{lc}表示虚拟限流电阻;σ表示虚拟限流阻抗阻感比;m为虚拟阻抗系数;I为变流器输出电流;I_{th}为启动自适应虚拟限流

阻抗的电流阈值。

为防止无功下垂控制故障期间持续降低内电势，削弱无功支撑能力，在投入虚拟限流阻抗的同时闭锁无功环，使VSG维持额定内电势E_0运行。虚拟阻抗系数m根据过流最严重工况进行整定，此时投入最大虚拟限流阻抗使输出电流I刚好达到电流限幅值$I_{\lim}$。根据式(12)可得：

$$I_{\lim}=\begin{cases}\dfrac{E_0}{\sqrt{(R_{eq}+R_{lc,max})^2+(X_g+X_{lc,max})^2}}, & \delta\in[0,\pi/3)\\ \dfrac{2E_0(1-\cos\delta)}{\sqrt{(R_{eq}+R_{lc,max})^2+(X_g+X_{lc,max})^2}}, & \delta\in[\pi/3,\pi]\end{cases} \tag{17}$$

式中，$R_{lc,max}$与$X_{lc,max}$分别为最大虚拟限流电阻与电抗，可通过将$I=I_{\lim}$代入式(17)所得。求解上式，可得虚拟阻抗系数m为：

$$m=\begin{cases}\dfrac{-(R_{eq}+\sigma X_g)+\sqrt{(R_{eq}+\sigma X_g)^2-(1+\sigma^2)(R_{eq}^2+X_g^2-E_0^2/I_{\lim}^2)}}{(1+\sigma^2)(I_{\lim}-I_{th})}, & \delta\in[0,\pi/3)\\ \dfrac{-(R_{eq}+\sigma X_g)+\sqrt{(R_{eq}+\sigma X_g)^2-(1+\sigma^2)(R_{eq}^2+X_g^2-2E_0^2(1-\cos\delta)/I_{\lim}^2)}}{(1+\sigma^2)(I_{\lim}-I_{th})}, & \delta\in[\pi/3,\pi]\end{cases} \tag{18}$$

尽管虚拟限流阻抗的引入改变了VSG系统的暂态等效参数，但通过参数进行合理的设计，仍可确保基于式(16)的改进控制方案的有效性，其核心目标在于使系统在故障期间具备稳态平衡点与充足的减速面积。

3.2　控制参数设计

3.2.1　下弯调节系数k的约束条件

如图5所示，修正后的等效参考功率$P'^{(3)}_{ref}$需具备足够的“下弯”特性，即在任意故障深度下需满足双重目标，其一是确保故障下系统稳态平衡点存在；其二是避免与故障曲线$P_{f'}$两次相交而减小最大减速面积。因此，令$P'^{(3)}_{ref}(\pi/2)<0$成立，使得稳态平衡点被限制在$(0,\pi/2)$范围内，系统因而具备充足减速面积。为求得k的取值范围，将条件$P'^{(3)}_{ref}(\pi/2)<0$与式(8)、式(14)及式(15)联立可得：

$$P_0-k\cdot\frac{E_0^2\cos(\pi/3)}{R_{total}^2+X_{total}^2}+\frac{3R_{v,total}E_0^2}{R_{total}^2+X_{total}^2}<0 \tag{19}$$

式中：$R_{v,total}$为总虚拟电阻；R_{total}与X_{total}分别为计及虚拟限流阻抗后的系统总等效电阻、总等效电抗。考虑自适应虚拟限流阻抗控制下，这些参数满足如下关系，即

$$\begin{cases}R_{v,total}\leqslant R_v+R_{lc,max}\\ R_{total}\leqslant R_g+R_v+R_{lc,max}\\ X_{total}\leqslant X_g+X_{lc,max}\end{cases} \tag{20}$$

将(20)代入式(19)中，得到下弯调节系数k需满足的约束条件：

$$k>2[(R_g+R_v+R_{lc,max})^2+(X_g+X_{lc,max})^2]\frac{P_0}{E_0^2\cdot 6(R_v+R_{lc,max})} \tag{21}$$

当k满足上述条件，即可保证修正后等值参考功率$P'^{(3)}_{ref}$具有充足的“下弯”特性，进而确保故障后系统具备稳态平衡点和足够的减速面积。

3.2.2　阻感比σ的约束条件

前述的自适应虚拟阻抗限流控制，能在故障期间将电流限制在$I_{\lim}$内。文献[25]指出，此模式下系统可能存在新的稳定平衡点，若故障恢复后系统被“闩锁”在该稳定平衡点，则无法返回额定运行状态。

为揭示此风险并找到解决方案，需分析在故障电压恢复后、仍处于限流状态时的输出功率特性。联立式(12)与(16)，可解得虚拟限流阻抗R_{lc}、X_{lc}与功角δ的函数关系，进而由式(7)求得该状态下的输出功率$P_{lc}(\delta)$。图6所示为系统故障恢复后，不同阻感比σ下$P_{lc}(\delta)$的曲线。图中计算所用参数与第4章中仿真模型参数保持一致。

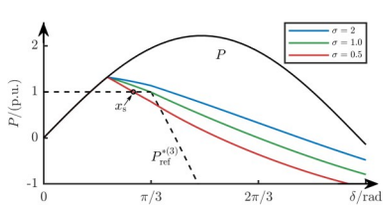


图6　不同σ的限流状态下功率曲线

Fig.6　$P-\delta$curve in current limiting mode with different values of σ.

由图6可见，阻感比σ直接影响限流状态的功率曲线P_{lc}的位置。当$\sigma=0.5$时，P_{lc}曲线与修正参考功率$P^{*(3)}_{ref}$相交于平衡点x_s，这表明故障恢复后系统存在被闩锁的风险。然而，当σ增大，P_{lc}曲线整体向右上方移动，该稳定平衡点随之消失。基于图中功率曲线位置关系，可导出约束条件如下：若满足$P_{lc}(\pi/3)>P_0$，则P_{lc}曲线将全程位于$P^{*(3)}_{ref}$上方，P_{lc}曲线与修正参考功率$P^{*(3)}_{ref}$无交点。在此条件下，故

障恢复后系统将持续减速,直到退出限流模式并回到额定运行状态。

该约束条件的具体计算如下:当$\delta=\pi/3$时,虚拟限流阻抗的值满足:

$$[(R_{eq}+R_{lc})^2+(X_g+\sigma R_{lc})^2]\cdot I_{lim}^2=E_0^2 \quad (22)$$

限流状态下的输出功率P_{lc}为:

$$P_{lc}(\pi/3)=0.75\frac{E_0^2(R_{eq}+R_{lc})+\sqrt{3}E_0^2(X_g+\sigma R_{lc})}{(R_{eq}+R_{lc})^2+(X_g+\sigma R_{lc})^2}-1.5(R_v+R_{lc})I_{lim}^2 \quad (23)$$

将约束条件$P_{lc}(\pi/3)>P_0$与式(22)、(23)联立求解,经整理可解得阻感比σ需满足的约束条件。该条件表明,σ的取值存在一个明确的下界σ_{max},其值由系统参数及电流限值决定。满足$\sigma>\sigma_{max}$是系统避免故障后闭锁的充分条件。

3.3 改进暂态控制流程

综合前文,所提出的VSG改进暂态控制策略的完整故障穿越流程如图7所示。由图7可知,改进暂态控制流程主要步骤如下,即

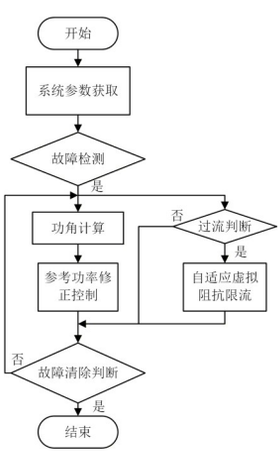


图7 改进故障穿越控制流程图

Fig. 7 Flowchart of the improved fault ride-through control strategy.

1)系统参数获取。控制策略所需的系统参数,包括初始功角δ_0、电网线路阻抗R_g与X_g等,可在系统正常运行期间通过调度自动化系统的状态感知与参数辨识技术预先获取,确保暂态控制能快速响应。

2)故障检测。鉴于构网型VSG的电压支撑特性使其端电压在故障δ下变化不显著[14],本策略选用更敏感的VSG输出电流I作为故障判据。当$I>1.2$p.u.时(超出国家标准规定的正常电压下储能变流器短时过载能力[26]),即判定为电网故障,故障暂态控制流程启动。

3)功角计算。改进控制策略需实时功角由初始稳态功角δ_0与角速度偏差积分得到:

$$\delta=\delta_0+\int(\omega-\omega_0)\mathrm{d}t \quad (24)$$

4)参考功率修正控制。通过式(21)确定下弯调节系数k,将实时功角代入式(15)中更新参考功率,建立故障下稳定平衡点,以防止功角失稳。

5)过流判断。若故障电流超过阈值I_{th},则投入自适应虚拟限流阻抗。

6)自适应虚拟阻抗限流。通过式(18)计算虚拟阻抗系数m,投入式(16)所示的自适应虚拟限流阻抗。在此控制下,故障电流被限制于I_{lim}以内,避免变流器过流损坏。

7)故障恢复。电网电压恢复后,系统功角与变流器输出电流均逐渐减小至额定值,自适应虚拟限流阻抗与参考功率修正控制依次投出,系统的故障穿越过程结束。

4 仿真验证

为验证理论分析的正确性与所提改进控制策略的有效性,基于MATLAB/Simulink平台搭建了如图1所示的VSG并网系统仿真模型,具体仿真参数见表1。

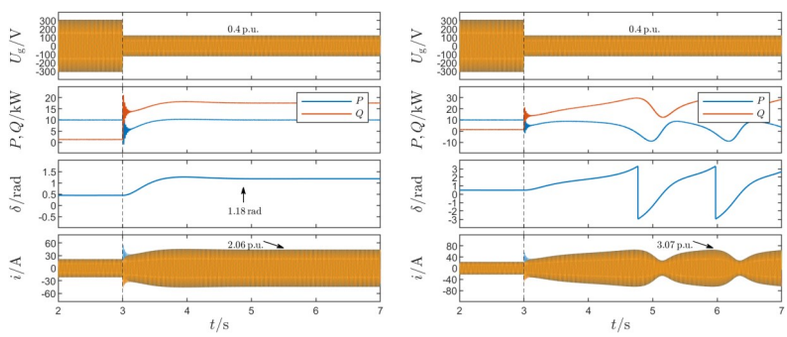
表1 仿真参数

Table 1 Simulation parameters

参数名称	参数值	参数名称	参数值
直流电压U_{dc}/ V	700	有功功率参考值P_0/kW	10 kW
电网相电压幅值U_g/ V	311	无功功率参考值Q_0/kVar	0 kVar
额定角频率ω_0/rad	100π	虚拟转动惯量J	1
电网电阻R_g/mΩ	50	有功阻尼系数K_p	5
电网电感L_g/mH	20	电压积分系数K	100
滤波电感L_f/mH	2	无功下垂系数K_q	2500
滤波电容C_g/μF	30	虚拟电阻R_v/mΩ	550 mΩ

4.1　虚拟电阻对暂态稳定性的影响验证

首先，构建了一个电网电阻充足且其余控制参数一致的对比系统，以验证第2节理论分析的正确性。故障发生电网电压跌落至0.4 p.u.时，无改进控制策略的传统VSG并网系统暂态响应波形如图8所示。在$R_g=0.6\Omega, R_v=0\Omega$的对比系统中，故障后系统功角增大最终稳定于1.18 rad，而在采用虚拟电阻补偿（$R_g=0.05\Omega, R_v=0.55\Omega$）的系统中，故障后功角逐渐摆开最终振荡失稳。结果表明，采用虚拟电阻补偿的系统具有更差的暂态稳定性，与前文理论分析相符。此外，在传统VSG控制策略下，两种场景的故障电流分别达到2.06 p.u.与3.07 p.u.，均超出了变流器的过电流限制$I_{lim}=1.5$p.u.，这表明了附加限流控制的必要性。



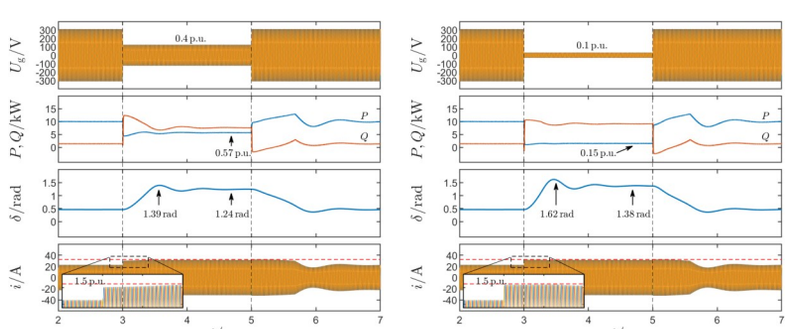
(a)R_g = 0.6Ω, R_v = 0Ω　　(b)R_g = 0.05Ω, R_v = 0.55Ω

图8　0.4 p.u.电压跌落时传统VSG控制的暂态响应

Fig. 8　Transient response of the conventional VSG control under grid voltage dip to 0.4 p.u.

4.2　所提改进策略有效性验证

在图8(b)对应场景中，引入本文所提出的改进控制策略，并根据3.2节设计要求选取参数$k=65, \sigma=2$。仿真设置系统于3s时发生故障，持续2s后故障恢复，其暂态响应波形如图9(a)所示。对比结果显示，采用改进控制策略后，VSG能够保持稳定运行，且在故障期间仍能向电网输送0.57 p.u.的有功功率。在自适应虚拟限流阻抗作用下，故障发生至恢复期间变流器电流始终未超过1.5 p.u.的安全阈值，保证变流器不遭受过流损坏。图9(b)展示了电网电压跌落至0.1 p.u.的深度故障情景，仿真结果表明，即使在功率输送能力严重受限的情况下，所提改进控制策略仍可通过功角反馈机制建立故障条件下的稳定平衡点，从而保障VSG并网系统的暂态稳定性。



(a)U_{gf} = 0.4p.u.　　(b)U_{gf} = 0.1p.u.

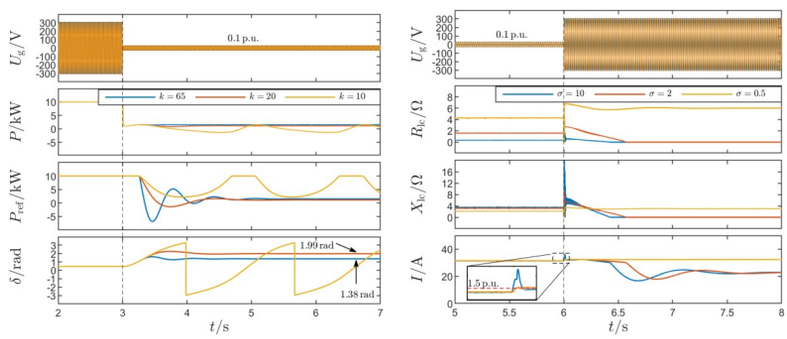
图9　所提改进控制下VSG暂态响应（k = 65,σ = 2）

Fig. 9　Transient response of the VSG with the proposed improved control (k = 65,σ = 2).

为验证第3.2节所提控制参数设计准则的有效性，图10对比了电网电压跌落至0.1 p.u.时，不同参数下VSG的暂态响应。根据式(21)、(23)，在当前仿真设定下，参数的理论设计边界为$k>60$与$\sigma>1$。

1）下弯调节系数k的影响验证。图10(a)对比了不同参数k下故障发生后的暂态响应，图中蓝色曲线、红色曲线、黄色曲线分别代表$k=65$、$k=20$

及$k=10$的情况。由图10可见,当$k=65$时,系统可以保持稳定,故障期间功角稳定在1.38 rad。当$k=10$时,参考功率"下弯"特性不足,在深度故障下无法建立稳定平衡点,导致系统振荡失稳。值得注意的是,当$k=20$(不满足设计要求)时系统虽能稳定,但其故障稳态功角(1.99 rad)超过$\pi/2$的设计要求,不利于故障后系统快速恢复。这也验证了式(22)是多方面考虑的保守性参数设计。



(a)k = 65, 20, 10　　(b)σ = 10, 20, 0.5

图10　不同参数下VSG暂态响应对比

Fig.10　Comparison of VSG transient responses under different parameter sets.

2)阻感比σ的影响验证。图10(b)对比了不同参数σ下故障恢复时的暂态响应,图中蓝色曲线、红色曲线、黄色曲线分别代表$\sigma=10$、$\sigma=2$及$\sigma=0.5$的情况。由图10可见,当$\sigma=10$或2(均满足$\sigma>1$)时,系统能在故障恢复后顺利退出限流模式。反之,当$\sigma=0.5$(不满足约束)时,在故障恢复后自适应虚拟限流阻抗不能减小至零,系统不能主动退出限流状态,即发生图6所示的"闭锁"现象,这验证了参数σ约束条件的必要性。此外,对比故障恢复瞬间的电流峰值,发现当$\sigma=10$时电流超过安全阈值I_{lim}。这表明在满足约束的前提下,应选取较小的虚拟限流阻抗阻感比,以更有效地抑制暂态过电流。

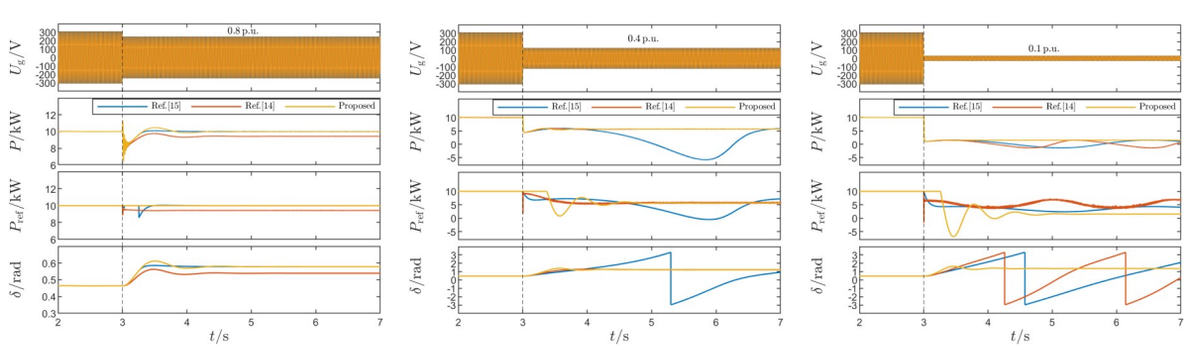
4.3　与现有方法的对比分析

为了验证本文所提基于功角反馈的参考功率修正控制的优越性,本节将其与基于频率偏差反馈的参考功率修正[15]和基于电压偏差反馈的参考功率修正[14]两种典型方法进行对比验证,两种方法修正方程分别为:

$$P_{ref}=P_0-K_\omega(\omega-\omega_0) \tag{25}$$

$$P_{ref}=P_0-K_u(E_0-U) \tag{26}$$

基于本文仿真参数,取$K_\omega=100P_n/\omega_0$,$K_u=40$。不同故障深度下系统暂态响应对比如图11所示。图中蓝色曲线、红色曲线、黄色曲线分别代表电压反馈法[15]、频率偏差反馈法[14]与本文所提方法。



(a)U_{gf} = 0.8p.u.　　(b)U_{gf} = 0.4p.u.　　(c)U_{gf} = 0.1p.u.

图11　不同参考功率修正控制下VSG暂态响应对比

Fig. 11　Comparison of VSG transient responses under different control strategies.

图11(a)为电网电压跌落至0.8 p.u.时系统的暂态响应,三种方法均能维持系统功角稳定。然而文献[15]的方法不可避免的降低了功率参考值,使得故障下VSG不能保持额定功率输出,导致变流器容

量未被充分利用。相比之下,本文所提方法在系统功角未超过$\pi/3$时将参考功率修正为零,保证了轻度故障时能维持额定功率输出。在此场景下,文献[14]的方法能迅速调整参考功率,具有最好的动态性能

图11(b)为电网电压跌落至0.4 p.u.时系统的暂态响应。由图可见,文献[14]的方法仅能减慢功角摆动,但在故障期间无法保暂态稳定,这表明该方法依赖故障后固有平衡点的存在。而文献[15]的方法与本文方法均能有效修正参考功率,建立稳定平衡点,保证了系统稳定。

图11(c)为电网电压跌落至0.1 p.u.的极端故障下系统暂态响应。结果表明在功率传输能力严重受限时,文献[14]的方法与文献[15]的方法均不能建立稳定平衡点,系统最终振荡失稳。这表明现有方法其控制逻辑或参数受到故障深度影响,难以应对所用场景。而本文方法不受故障深度的制约,在深度故障下仍能有效修正参考功率,建立稳定平衡点以确保系统稳定。

5 结论

本文针对含虚拟电阻补偿的VSG并网系统,研究了其暂态稳定机理,并提出了一种基于功角反馈的参考功率修正控制策略,以提升电网故障下系统的暂态稳定性,所得结论如下:

1)揭示了虚拟电阻恶化暂态稳定性的机理。在电网电压跌落下,虚拟电阻增大了等效参考功率,加剧了VSG虚拟转子上的功率不平衡,导致故障期间加速面积增大、最大减速面积减小。相比于不含虚拟电阻补偿的VSG,含虚拟电阻时,系统故障极限切除角更小,暂态稳定性更差。

2)提出了基于功角反馈的参考功率修正控制策略。该策略将功角作为反馈,对虚拟电阻功率进行过补偿,重构出具有“下弯”特性的等效参考功率曲线。理论分析与仿真实验表明,该方法能在故障中建立稳定平衡点,进而保证系统功角稳定。

3)所提策略具有良好的适应性。一方面,与现有方法相比所提策略不受故障深度的制约,即使在功率输出能力严重受限的情况下,依然能保证系统稳定;另一方面,由于不含虚拟电阻补偿的VSG并网系统可以视作电阻为零的特例,因此所提方法依然适用。

需要指出的是,本文聚焦于暂态稳定性问题,所提方法在控制性能、模型精度及电能质量等方面的表现有待进一步研究,这将作为后续工作的重点。

参考文献:

[1] D. Yang, X. Wang and F. Blaabjerg, Fast Power Control for VSCs to Enhance the Synchronization Stability in Ultra-Weak Grids [C]// 2018 IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM), Portland, OR, USA, 2018, pp. 1-6.

[2] X. Wang, M. G. Taul, H. Wu, Y. Liao, F. Blaabjerg and L. Harnefors, Grid-Synchronization Stability of Converter-Based Resources—An Overview [J]// IEEE Open Journal of Industry Applications, vol. 1, pp. 115-134, 2020.

[3] J. Wang, Y. Wang, Y. Gu, W. Li and X. He, Synchronous frequency resonance of virtual synchronous generators and damping control [C]// 2015 9th International Conference on Power Electronics and ECCE Asia (ICPE-ECCE Asia), Seoul, Korea (South), 2015, pp. 1011-1016.

[4] 杨若羽,刘欣,贾焦心,等.基于阻抗电路模型的构网型逆变器并网稳定性分析及虚拟阻抗设计[J/OL].电网技术,1-21[2026-01-16]
YANG Ruoyu, LIU Xin, JIA Jiaoxin, et al. Grid-connected stability analysis and virtual impedance design of grid-built inverter based onimpedance circuit model[J/OL]. Power System Technology, 1-21[2026-01-16]

[5] 刘延龙,陈晓光,姚爽爽,等.基于构网型SVG控制优化的双馈风场高频谐振抑制分析[J].电力建设,2024,45(11):125-136.
LIU Yanlong, CHEN Xiaoguang, YAO Shuangshuang, et al. Analysis of High-Frequency Resonance Suppression in Doubly-FedWind Farms Based on Grid-Forming SVG Control Optimization[J]. Electric Power Construction, 2024,45(11):125-136.

[6] 韩鹏,徐式蕴,汪乐天,等.构网型变换器故障恢复阶段电流越限机理及安全控制研究[J/OL].中国电机工程学报,1-15[2026-01-16].
HAN Peng, XU Shiyun, WANG Letian, et al. Research on Overcurrent Mechanism and Safe Control of Grid-forming Converter DuringFault Recovery Stage[J/OL]. Proceedings of the CSEE, 1-15[2026-01-16].

[7] 范宸珲,秦晓辉,齐磊,等.构网型下垂控制中虚拟阻抗的作用、改进及研究前景分析[J].电网技术,2024,48(06):2237-2250.
FAN Chenhui, QIN Xiaohui, QI Lei, et al. Analysis of the Role, Improvement, and Research Prospects of Virtual Impedance inGrid-forming Droop Control[J]. Power System Technology, 2024,48(06):2237-2250.

[8] W. Diao, J. Mei, L. Wang and G. Wang, Transient

Angle Suppression and Voltage Support Control for VSG Based on Virtual Circuit Elements[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 72, no. 8, pp. 7983-7995, Aug. 2025.

[9] T. Qoria , H. Wu , X. Wang and I. Colak , Variable Virtual Impedance-Based Overcurrent Protection for Grid-Forming Inverters: Small-Signal, Large-Signal Analysis and Improvement[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 14, no. 5, pp. 3324-3336, Sept. 2023.

[10] 付熙坤,黄萌,凌扬坚,等.功率耦合和电流限幅影响下构网型变流器的暂态同步稳定分析[J].中国电机工程学报,2024,44(07):2815-2825.
FU Xikun, HUANG Meng, LING Yangjian, et al. Transient Synchronization Stability Analysis of Grid-forming Converter Influenced byPower-coupling and Current-limiting[J]. Proceedings of the CSEE, 2024,44(07):2815-2825.

[11] J. Sun , X. Xing , R. Zhang and C. Zhang , An Enhanced Transient Angle Stability Scheme of VSG Based on the PCH Theory[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 72, no. 4, pp. 3861-3871, April 2025.

[12] X. Xiong , C. Wu and F. Blaabjerg , An Improved Synchronization Stability Method of Virtual Synchronous Generators Based on Frequency Feedforward on Reactive Power Control Loop[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 36, no. 8, pp. 9136-9148, Aug. 2021.

[13] S. Chen , Y. Sun , H. Han , S. Fu , S. Luo and G. Shi , A Modified VSG Control Scheme With Virtual Resistance to Enhance Both Small-Signal Stability and Transient Synchronization Stability[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 38, no. 5, pp. 6005-6014, May 2023.

[14] X. Xiong , C. Wu and F. Blaabjerg , Effects of Virtual Resistance on Transient Stability of Virtual Synchronous Generators Under Grid Voltage Sag[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 69, no. 5, pp. 4754-4764, May 2022.

[15] 李劲松,沈琦丰,李国锋,等.考虑虚拟电阻局限的电网电压跌落VSG暂态稳定性提升[J].高电压技术,2024,50(08):3665-3679.
LI Jingsong, SHEN Qifeng, LI Guofeng, et al. Transient Stability Enhancement of VSG Under Grid Voltage Sag Considering the Limitationof Virtual Resistance [J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(08): 3665-3679.

[16] 代鹏程,张兴,谢震.构网型全功率风电变流器的平滑模式切换策略[J].高电压技术,2025,51(04):1589-1598.
DAI Pengcheng, ZHANG Xing, XIE Zhen. Smooth Mode Switching Strategy for Grid-forming Full-power Wind Turbine Converters[J]. High Voltage Engineering, 2025,51(04):1589-1598.

[17] C. Shenet al., Coordinated FRT Control for Paralleled Grid- Forming Converters With Enhanced Transient Stability and Current Control Flexibility[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 60, no. 2, pp. 3653-3663, March-April 2024.

[18] 李清辉,葛平娟,肖凡,等.基于功角与电流灵活调控的VSG故障穿越方法研究[J].中国电机工程学报,2020,40(07):2071-2080+2387.
LI Qinghui, GE Pingjuan, XIAO Fan, et al. Study on Fault Ride-through Method of VSG Based on Power Angle andCurrent Flexible Regulation[J]. Proceedings of the CSEE, 2020,40(07):2071-2080+2387.

[19] 李建林,邹菲,游洪灏,等.构网型储能变流器自适应低电压穿越控制策略[J].电工技术学报,2025,40(09):2724-2737.
LI Jianlin, ZOU Fei, YOU Honghao, et al. Adaptive Low-Voltage Ride-Through Control Strategy ofGrid-Forming Energy Storage Converter[J] Transactions of China Electrotechnical Society, 2025, 40(09): 2724-2737.

[20] 雷振宇,闵勇,陈磊,等.变流器主导电力系统的定频构网及有功控制技术[J/OL].中国电机工程学报,1-18[2026-01-16].
LEI Zhenyu, MIN Yong, CHEN Lei, et al. Frequency-fixed Grid-forming and Active Power Control for CIG-dominated Power System[J/OL]. Proceedings of the CSEE, 1-18[2026-01-16].

[21] 于彦雪,关万琳,陈晓光,等.基于序阻抗的虚拟同步机同步频率谐振现象[J].电工技术学报,2022,37(10):2584-2595.
YU Yanxue, GUAN Wanlin, CHEN Xiaoguang, et al. Synchronous Frequency Resonance in Virtual Synchronous GeneratorBased on Sequence-Impedance[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(10):2584-2595.

[22] 刘龙,胡彬,王垚鑫,等.构网型变流器宽短路比范围适应性分析与提升[J].电力系统自动化,2025,49(02):64-72.
LIU Long, HU Bin, WANG Yaoxin, et al. Adaptability Analysis and Enhancement of Grid-forming Converter for Wide-range Short-circuit Ratio[J]. Automation of Electric Power Systems, 2025,49(02):64-72.

[23] 闫子晗,艾欣,于思奇,等.基于多环控制解耦的构网型

变流器阻抗特性与振荡稳定机理研究[J/OL].电工技术学报，1-18[2026-01-16].
YAN Zihan, AI Xin, YU Siqi, et al. Impedance Characteristics and Oscillation Stability Mechanism in Grid-Forming Converters Based on Multi-Loop Decoupling [J/OL]. Transactions of China Electrotechnical Society, 1-18[2026-01-16].

[24] 黄炳政，陈俊儒，刘牧阳，等.基于自适应虚拟阻抗的构网型变流器暂态稳定性提升策略研究[J].电力系统保护与控制，2025，53(12):57-68.
HUANG Bingzheng, CHEN Junru, LIU Muyang, et al. Grid-forming converter transient stability enhancement strategy based on adaptive virtual impedance[J]. Power System Protection and Control, 2025, 53(12): 57-68.

[25] B. Fan and X. Wang, Equivalent Circuit Model of Grid-Forming Converters With Circular Current Limiter for Transient Stability Analysis[J]. IEEE Transactions on Power Systems, vol. 37, no. 4, pp. 3141-3144, July 2022.

[26] 国家市场监督管理总局，国家标准化管理委员会. GB/T 34120-2023. 电化学储能变流器技术要求[S]. 北京：中国标准出版社，2023.
State Administration for Market Regulation, Standardization Administration. GB/T 34120-2023 Technical requirements for power conversion system of electrochemical energy storage system[S]. Beijing: Standards Press of China, 2023.