

弱、极弱电网场景下构网型变流器调频能力提升技术研究

赵冬梅, 裴建楠*, 白俊辉, 徐辰宇, 宋晨铭, 刘崇茹

(华北电力大学电气与电子工程学院, 北京市 昌平区 102206)

Research on Improving Frequency Modulation Capability of Grid-forming Converter Under Weak and Extremely Weak Grid Condition

ZHAO Dongmei, PEI Jiannan*, BAI Junhui, XU Chenyu, SONG Chenming, LIU Chongru

(School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University,
Changping District, Beijing 102206, China)

ABSTRACT: VSG technology has been widely concerned because of its good damping and inertia support characteristics, but it is difficult to suppress the active power transient overshooting and power oscillation caused by the weakening of control performance when the working condition and scene change in the frequency modulation process. The frequency modulation capability is not suitable enough. Based on the existing VSG control units, this paper firstly establishes the VSG small signal model related to multiple control units through theoretical deduction. On this basis, the concept of VSG feasible domain of frequency modulation capability is proposed from aspect of classical control theory, and the influence of virtual inertia, additional damping coefficient, power grid strength and other parameters on VSG dynamic performance and feasible domain is quantitatively analyzed. In order to solve the problem that VSG frequency modulation performance can not be satisfied under different working conditions and scenarios at same time, a frequency modulation capability enhancement strategy based on virtual speed flexible regulation is proposed for extremely weak grid. Finally, simulation is constructed in PSCAD/EMTDC, and the effectiveness of the proposed control strategy is verified.

KEY WORDS: grid-forming technology; virtual synchronous generator(VSG); additional damping; weak and extremely weak grid; frequency modulation capability; small signal model

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFB2402700); 国家电网有限公司科技项目(52272222001J)。

National Key R&D Program of China (2022YFB2402700); Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (52272222001J)。

摘要: 虚拟同步发电机(virtual synchronous generator, VSG)型构网控制技术因其良好的阻尼与惯量支撑特性已被广泛关注,但其存在调频过程中难以抑制因工况、场景改变时控制性能弱化所导致的有功暂态超调、功率振荡等缺陷,调频能力适用度不足。该文首先在现有的VSG控制环节的基础上,通过理论推导建立了融合多控制环节的VSG调频小信号模型,在此基础上结合经典控制理论提出了VSG调频能力可行域的概念,用以定量表征和度量虚拟惯量、附加阻尼系数、电网强度等参数对VSG调频动态性能的影响。针对多工况、多场景下VSG调频性能无法兼顾以及控制参数不易整定的问题,提出了一种基于灵活调速控制的VSG调频能力提升策略。最后在PSCAD/EMTDC中构建仿真,并验证所提控制策略的有效性。

关键词: 构网技术; 虚拟同步发电机; 附加阻尼; 弱、极弱电网; 调频能力; 小信号模型

0 引言

新能源聚集区域“三北”地区基本上都采用集中式大规模开发和远距离高压输送相结合的模式,呈现出基地外送线路距离过长、网架结构相对薄弱、缺乏常规火电支撑的特点,这极易导致电网出现弱网甚至极弱电网特征^[1-2],虚拟同步发电机(virtual synchronous generator, VSG)型构网控制技术具有良好的弱电网稳定性能^[3],以及可以提供惯量、电压支撑的优点,近年来受到了业内广泛的关注,将会在“双高”电力系统安全稳定运行方面发挥重要作用。

针对弱、极弱电网场景下VSG型构网技术调频能力提升方面的研究,主要集中在其调频功能的

定位、调频过程中暂态性能提升两方面。在调频功能的定位方面,文献[4]针对 VSG 惯量支撑与一次调频功能定位不清晰现状,从惯量支撑、一次调频的功能与物理意义的角度,并结合相关行业规程明确了 VSG 在大电网中应用时此二者的功能定位需求,通过仿真分析了在大型同步电网频率事故过程中不同 VSG 控制功能对系统频率的影响。最后指出,在大型同步电网中,一次调频能力下降比系统惯量下降所带来的影响更为严重,因此,较之于短时的惯量支撑功率,系统更需要 VSG 发挥一次调频功率的持续支援作用。

在调频过程中暂态性能提升方面,目前主要集中在 VSG 虚拟惯量、阻尼参数优化以及有功控制环节改进增强两方面。在 VSG 虚拟惯量、阻尼参数优化方面,文献[5-10]针对 VSG 控制特性呈现的超调、振荡现象,使用全阶状态方程、伯德图、序阻抗等小信号分析方法定性、定量分析了虚拟惯量、阻尼系数、电网阻抗等参数对系统稳定性和动态性能的影响。研究指出,采用固定参数的 VSG 具有明显的局限性,其控制特性往往只能适用某一种场景,在电网强度改变时,控制性能有出现削减、恶化的情况发生,但其并没有深入研究虚拟惯量和阻尼系数等控制参数的优化方法。为此,有些学者提出了以频率偏差、频率变化率检测为基础的虚拟惯量与阻尼自适应控制,从而保证 VSG 调频控制性能在一定程度上能够兼顾不同的运行工况。文献[11]对 VSG 的阻尼、虚拟惯量均采用自适应控制的方式,实现了对 VSG 控制性能的动态优化。但其采用的是棒-棒控制方式,只能保证控制参数在设定的两个数值中顺利切换,存在自适应参数不良突变的缺陷。文献[12]在其基础上将虚拟惯量、阻尼设计成与频率、频率变化率相关的自适应指数型函数,保证参数能维持指数变化趋势,有效规避了自适应参数的不良突变。但采用这种处理方式还需要引入额外控制系数,造成参数整定难度进一步加大。文献[13]针对多种不同的自适应函数型虚拟惯量、阻尼系数的控制效果进行对比分析,研究结果表明,采用指数型自适应策略的 VSG 控制性能最佳。

除此之外,一些学者尝试利用电网阻抗在线辨识技术实时获取电网等值阻抗,进而不断修正 VSG 控制系统的参数,达到提升 VSG 调频过程中控制性能增强的效果。文献[14]首先深入分析了不同电

网强度下 VSG 虚拟惯量、阻尼系数的选取原则;随后,提出一种电网阻抗在线估计算法;最后,在此基础上进一步提出一种 VSG 自适应控制性能增强策略,但电网阻抗实时算法相对复杂。在 VSG 有功控制环节改进、增强方面,一些学者尝试在 VSG 有功控制环节中增加一些附加控制,从而达到系统阻尼比增加、VSG 的控制性能提升的效果。文献[15]在传统有功环节中引入了一个超前环节,进而使得原有的 VSG 构网惯性控制特性转变为超前滞后特性,通过合理修改超前环节的参数,来提升 VSG 的控制性能。文献[16]分别将虚拟转速与电网频率实测、估计数值的偏差引入到 VSG 有功控制环节中,并提出了两种改进策略,对改进策略的参数设计方法进行详细介绍;随后,针对所提出的两种不同的控制方法进行了电网频率扰动、功率指令扰动的仿真测试,结果表明,将虚拟转速与电网频率实测偏差引入此种方式更具高效性。文献[17-18]分析了并网 VSG 的大扰动功角稳定性,在此基础上提出了附加阻尼策略,使用小干扰定性与大干扰定量相结合的分析方法,对阻尼比和频率变化率(rate of change of frequency, RoCoF)等指标进行定性分析,对电网故障发生后 VSG 功角稳定性作出定量评估。仿真结果表明,附加阻尼策略可以有效提升 VSG 小干扰与大干扰层面上的稳定性。

综合来看,上述研究在改善 VSG 调频暂态性能等方面发挥了积极作用,但现阶段仍面临如下局限:1) VSG 的虚拟惯量与阻尼等参数在不同工况、场景下的选取原则、整定范围尚需完善,以便为工程上提供有效的参考;2)如何解决工况、场景变动尤其当电网信息不明确时 VSG 控制性能适应性问题。即 VSG 型构网变流器在某种电网强度、某种参数组合下具有较好的稳定性及调频性能,但并不意味着其在其他各种工况下均具有相同的调频效果。因此如何实现多工况、多场景下构网型变流器控制性能仍能维持在最佳状态是一个技术难题;3)在极弱电网场景下,VSG 还面临因有功静态储备系数不足、调频过程中有功超调过大所导致的失稳问题。相比于同步发电机而言,构网型变流器具有控制参数灵活可调的优势,如何能够凭借其自身灵活性的优势实现多工况、多场景下调频能力增强对于弱、极弱电网场景下新能源远距离外送具有重要的意义。因此,本文在现有的 VSG 控制方法的基础上,通过理论推导并建立 VSG 型构

网变流器调频小信号模型，定量分析虚拟惯量、附加阻尼系数对 VSG 动态响应的影响，并结合经典控制理论进一步提出调频能力可行域的概念，用以定量刻画和度量虚拟惯量、附加阻尼在多工况、多场景下选取范围。针对场景变换时 VSG 调频性能可能出现弱化的问题，提出一种基于灵活调速控制的调频能力提升策略，使 VSG 控制性能均能维持在一个最佳的状态。

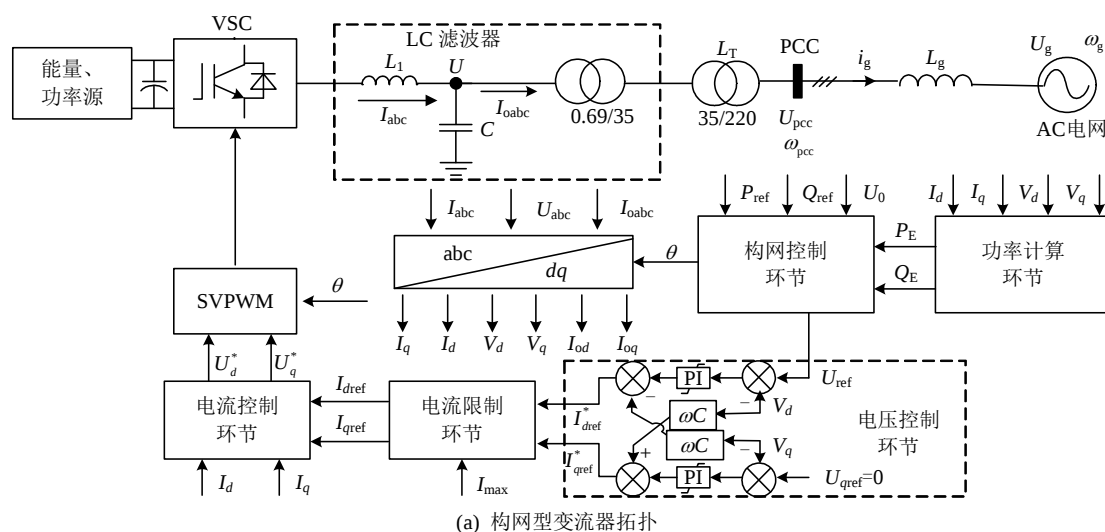
1 VSG 型构网变流器模型

传统的构网型控制通常由功率控制环节、电压控制环节组成，如图 1 所示。有功控制环节旨在模拟同步发电机的机械转子运动，VSG 虚拟角频率 ω 、相角 θ 由其输出获得，其包含一次调频环节、附加阻尼环节及虚拟同步控制环节 3 个部分。其中，附加阻尼环节的优势在于，在提升系统阻尼特性的同时，也可消除 VSG 调频过程中有功出力与参考值之间的误差。电压控制环节用于根据

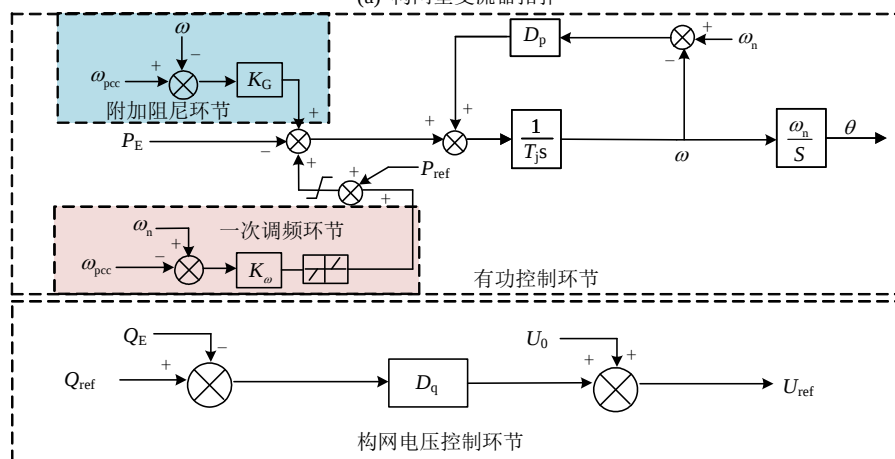
电压设定值 U_0 、无功下垂系数 D_q 等参数实时调节电压参考指令 U_{ref} ，其经双闭环控制输出电压调制信号，并与虚拟相角 θ 组合生成电压参考矢量。其中电压、电流环节采用电网电压前馈控制和电流前馈控制。正常工作情况下，VSG 是一个电压源，可以为电网提供电压和惯量支持，但由于 VSG 的过流能力较弱，因此往往在控制中嵌入过流限制环节，以保障 VSG 故障时机组的安全。图 1(a)中： U_g 、 ω_g 分别为电网电压及角频率； U_{pcc} 、 ω_{pcc} 分别为公共耦合点(point of common coupling, PCC)处的电压及角频率； I_{dq} 和 V_{dq} 分别为 VSG 电流和电压在虚拟同步坐标系下的 dq 轴分量； I_{odq} 为网侧电流 dq 轴分量。

由图 1(b)可得到 VSG 有功、电压控制环节的控制方程如下：

$$\begin{cases} T_j \frac{d\omega}{dt} = P_{ref} - P_E - D(\omega - \omega_n) \\ -K_\omega(\omega_{pcc} - \omega_n) - K_G(\omega - \omega_{pcc}) \end{cases} \quad (1)$$



(a) 构网型变流器拓扑



(b) 构网型变流器控制框图

图 1 构网型变流器拓扑及控制框图

Fig. 1 Topology and control diagram of grid-forming VSC

$$U_{\text{ref}} - U_0 = D_q(Q_{\text{ref}} - Q_E) \quad (2)$$

式中: P_E 和 Q_E 分别为 VSG 的有功功率和无功功率; P_{ref} 和 Q_{ref} 分别为 VSG 有功功率和无功功率的参考值; D_q 为无功下垂系数; K_ω 为有功调频系数; K_G 为附加阻尼增益; T_j 和 D 分别为 VSG 控制的惯性时间常数与阻尼系数, 用于模拟同步发电机的惯性和阻尼特性; U_0 为给定电压参考值; U_{ref} 为无功下垂控制生成的电压参考值; θ 为有功环控制环节生成的 VSG 虚拟相角。

2 融合多控制环节的 VSG 型构网变流器调频小信号模型

本节提出融合多控制环节的 VSG 型构网变流器调频小信号模型, 用以表征 VSG 各变量之间的小信号关系。在此之前, 做出如下简化: 1) LC 滤波器的滤波电容, 主要用于滤除输出电流的高频分量, 对瞬态分析影响不大, 电容的动态特性可以忽略^[19]; 2) 一般来说, 在控制时间尺度上, 外部功率控制环节动态调节过程比内部电压和电流环节慢 10 倍以上。在解耦的时间尺度上, 可以单独评估外环和内环。因此, 内部电压和电流双环可以被视为具有理想参考跟踪的单位增益, VSG 调频过程中的动态特性主要由外部功率控制环节决定^[20]; 3) 需要指出, 本文主要关注高压传输网络场景, 而不是中压网络或 X/R 相对较低的低压网络场景。

所提模型包括计及无功下垂特性的 VSG 有功-功角小信号模型、VSG-PCC-系统频率耦合关系小信号模型、计及一次调频与附加阻尼环节等多控制环节的 VSG 调频小信号模型 3 个部分。

2.1 计及无功下垂特性的 VSG 有功-功角小信号模型

该模型用于表征 VSG 有功、功角微增量在无功下垂控制主导下的关系。由图 1 知, VSG 输出有功功率 P_E 和无功功率 Q_E 的表达式为

$$\begin{cases} P_E = \frac{U_g U_{\text{ref}} \sin \delta}{X_\Sigma} \\ Q_E = \frac{U_{\text{ref}} (U_{\text{ref}} - U_g \cos \delta)}{X_\Sigma} \end{cases} \quad (3)$$

对式(3)相关变量在稳态点进行线性化可得 VSG 有功微增量 ΔP_E 、参考电压微增量 ΔU_{ref} 以及电网电压微增量 ΔU_g 为变量的有功、无功微增量 ΔP_E 、 ΔQ_E 计算式为

$$\begin{cases} \Delta P_E = \Delta \delta \cdot \frac{\partial P_E}{\partial \delta} \Big|_{x=x_0} + \Delta U_{\text{ref}} \cdot \frac{\partial P_E}{\partial U_{\text{ref}}} \Big|_{x=x_0} + \\ \Delta U_g \cdot \frac{\partial P_E}{\partial U_g} \Big|_{x=x_0} \\ \Delta Q_E = \Delta \delta \cdot \frac{\partial Q_E}{\partial \delta} \Big|_{x=x_0} + \Delta U_{\text{ref}} \cdot \frac{\partial Q_E}{\partial U_{\text{ref}}} \Big|_{x=x_0} + \\ \Delta U_g \cdot \frac{\partial Q_E}{\partial U_g} \Big|_{x=x_0} \end{cases} \quad (4)$$

式中: 带下标“0”的参数表示相应参数在稳态点的数值; $\delta = \delta_{\text{ref}} - \delta_g$; x 、 x_0 分别为表达式中相关变量及变量初值集合; X_Σ 为 VSG 机端与电网间的等值系统电抗。式(4)中相关偏导计算表达式如下:

$$\begin{cases} \frac{\partial P_E}{\partial \delta} \Big|_{x=x_0} = \frac{U_{\text{ref}0} \cdot U_{g0}}{X_\Sigma} \cos(\delta_0) \\ \frac{\partial Q_E}{\partial \delta} \Big|_{x=x_0} = \frac{U_{g0} \sin(\delta_0)}{X_\Sigma} \\ \frac{\partial P_E}{\partial U_{\text{ref}}} \Big|_{x=x_0} = \frac{U_{g0}}{X_\Sigma} \sin(\delta_0) \\ \frac{\partial Q_E}{\partial U_g} \Big|_{x=x_0} = -\frac{U_{\text{ref}0}}{X_\Sigma} \cos(\delta_0) \\ \frac{\partial P_E}{\partial U_g} \Big|_{x=x_0} = \frac{U_{\text{ref}0}}{X_\Sigma} \sin(\delta_0) \\ \frac{\partial Q_E}{\partial U_{\text{ref}}} \Big|_{x=x_0} = \frac{2U_{\text{ref}0} - U_{g0} \cos(\delta_0)}{X_\Sigma} \end{cases} \quad (5)$$

对式(2)在 VSG 稳态点进行线性化并忽略电网电压的变化, 即 $\Delta U_g = 0$, 可得:

$$\Delta U_{\text{ref}} = -D_q (\Delta U_{\text{ref}} \cdot \frac{\partial Q_E}{\partial U_{\text{ref}}} \Big|_{x=x_0} + \Delta \delta \cdot \frac{\partial Q_E}{\partial \delta} \Big|_{x=x_0}) \quad (6)$$

由式(6)可得 $\Delta \delta$ 与 ΔU_{ref} 之间的关系为

$$\Delta U_{\text{ref}} = K_{u\delta} \Delta \delta \quad (7)$$

其中:

$$K_{u\delta} = -\frac{D_q \cdot \frac{\partial Q_E}{\partial \delta} \Big|_{x=x_0}}{1 + D_q \cdot \frac{\partial Q_E}{\partial U_{\text{ref}}} \Big|_{x=x_0}} \quad (8)$$

将式(8)代入式(4), 并忽略电网电压的变化, 可得 VSG 有功、功角微增量在无功下垂控制主导下的关系如式(9)所示。

$$\begin{aligned} \Delta P_E &= \Delta \delta \cdot \frac{\partial P_E}{\partial \delta} \Big|_{x=x_0} + \Delta \delta \cdot K_{u\delta} \frac{\partial P_E}{\partial U_{\text{ref}}} \Big|_{x=x_0} = \\ &= \underbrace{\left(\frac{\partial P_E}{\partial \delta} \Big|_{x=x_0} + K_{u\delta} \frac{\partial P_E}{\partial U_{\text{ref}}} \Big|_{x=x_0} \right)}_{K_\delta} \Delta \delta \end{aligned} \quad (9)$$

2.2 VSG-PCC-系统频率耦合关系小信号模型

该模型用于表征 VSG、PCC、系统频率微增量在固有网架下的关系。PCC 处电压幅值 U_{pcc} 和相角 δ_{pcc} 满足式(10)、(11)。

$$\begin{cases} \frac{U_{ref} U_g}{X_\Sigma} \sin(\delta_{ref} - \delta_g) = P_E \\ \frac{U_{pcc} U_g}{X_\Sigma - X_{pcc}} \sin(\delta_{pcc} - \delta_g) = P_E \end{cases} \quad (10)$$

$$\frac{U_{ref}^2 + U_g^2 - 2U_{ref} U_g \cos(\delta_{ref} - \delta_g)}{U_{pcc}^2 + U_g^2 - 2U_{pcc} U_g \cos(\delta_{pcc} - \delta_g)} = \frac{X_\Sigma^2}{(X_\Sigma - X_{pcc})^2} \quad (11)$$

式中： X_{pcc} 为 VSG 机端至 PCC 点之间的等值电抗； δ_{ref} 、 δ_{pcc} 、 δ_g 分别为 VSG、PCC 处及电网的相角。由式(10)可得：

$$U_{pcc} = \frac{U_{ref} \sin(\delta_{ref} - \delta_g)(X_\Sigma - X_{pcc})}{\sin(\delta_{pcc} - \delta_g)X_\Sigma} \quad (12)$$

将式(12)代入式(11)，并引入中间变量 $K=X_\Sigma/(X_\Sigma-X_{pcc})$ ，可得：

$$\begin{aligned} & \underbrace{[U_{ref}^2 + U_g^2 - 2U_{ref} U_g \cos(\delta_{ref} - \delta_g)] \sin^2(\delta_{pcc} - \delta_g)}_{B_1} = \\ & \underbrace{(U_{ref}^2 \sin^2(\delta_{ref} - \delta_g) + K^2 U_g^2 \sin^2(\delta_{pcc} - \delta_g) - 2KU_{ref} U_g \sin(\delta_{ref} - \delta_g) \cos(\delta_{pcc} - \delta_g) \sin(\delta_{pcc} - \delta_g))}_{B_2} \end{aligned} \quad (13)$$

对式(13)在 VSG 稳态点进行线性化可得：

$$\begin{aligned} & K_1 \Delta U_{ref} + K_2 \Delta U_g + K_3 \Delta \delta_{ref} + \\ & K_4 \Delta \delta_{pcc} + K_5 \Delta \delta_g = 0 \end{aligned} \quad (14)$$

其中：

$$\begin{cases} K_1 = \left(\frac{\partial B_1}{\partial U_{ref}} \Big|_{x=x_0} - \frac{\partial B_2}{\partial U_{ref}} \Big|_{x=x_0} \right) \\ K_2 = \left(\frac{\partial B_1}{\partial U_g} \Big|_{x=x_0} - \frac{\partial B_2}{\partial U_g} \Big|_{x=x_0} \right) \\ K_3 = \left(\frac{\partial B_1}{\partial \delta_{ref}} \Big|_{x=x_0} - \frac{\partial B_2}{\partial \delta_{ref}} \Big|_{x=x_0} \right) \\ K_4 = \left(\frac{\partial B_1}{\partial \delta_{pcc}} \Big|_{x=x_0} - \frac{\partial B_2}{\partial \delta_{pcc}} \Big|_{x=x_0} \right) \\ K_5 = \left(\frac{\partial B_1}{\partial \delta_g} \Big|_{x=x_0} - \frac{\partial B_2}{\partial \delta_g} \Big|_{x=x_0} \right) \end{cases} \quad (15)$$

式(15)中相关参数如下：

$$\begin{aligned} & \frac{\partial B_1}{\partial U_{ref}} \Big|_{x=x_0} = [2U_{ref0} - 2U_{g0} \cos(\delta_{ref0} - \delta_{g0})] \cdot \sin^2(\delta_{pcc0} - \delta_{g0}) \\ & \frac{\partial B_1}{\partial U_g} \Big|_{x=x_0} = [2U_{g0} - 2U_{ref0} \cos(\delta_{ref0} - \delta_{g0})] \cdot \sin^2(\delta_{pcc0} - \delta_{g0}) \\ & \frac{\partial B_1}{\partial \delta_{ref}} \Big|_{x=x_0} = 2U_{ref0} U_{g0} \sin(\delta_{ref0} - \delta_{g0}) \sin^2(\delta_{pcc0} - \delta_{g0}) \\ & \frac{\partial B_1}{\partial \delta_{pcc}} \Big|_{x=x_0} = A_1 2 \sin(\delta_{pcc0} - \delta_{g0}) \cos(\delta_{pcc0} - \delta_{g0}) \\ & \frac{\partial B_1}{\partial \delta_g} \Big|_{x=x_0} = -2U_{ref0} U_{g0} \sin(\delta_{ref0} - \delta_{g0}) \sin^2(\delta_{pcc0} - \delta_{g0}) - 2 \sin(\delta_{pcc0} - \delta_{g0}) \cos(\delta_{pcc0} - \delta_{g0}) \cdot A_1 \\ & \frac{\partial B_2}{\partial U_{ref}} \Big|_{x=x_0} = 2U_{ref0} \sin^2(\delta_{ref0} - \delta_{g0}) - A_2 U_{g0} \\ & \frac{\partial B_2}{\partial U_g} \Big|_{x=x_0} = 2K^2 U_{g0} \sin^2(\delta_{pcc0} - \delta_{g0}) - A_2 U_{ref0} \\ & \frac{\partial B_2}{\partial \delta_{ref}} \Big|_{x=x_0} = 2U_{ref0}^2 \sin(\delta_{ref0} - \delta_{g0}) \cos(\delta_{ref0} - \delta_{g0}) - A_3 \\ & \frac{\partial B_2}{\partial \delta_{pcc}} \Big|_{x=x_0} = 2K^2 U_{g0}^2 \sin(\delta_{pcc0} - \delta_{g0}) \cos(\delta_{pcc0} - \delta_{g0}) - A_4 \\ & \frac{\partial B_2}{\partial \delta_g} \Big|_{x=x_0} = -2U_{ref0}^2 \sin(\delta_{ref0} - \delta_{g0}) \cos(\delta_{ref0} - \delta_{g0}) - 2K^2 U_{g0}^2 \sin(\delta_{pcc0} - \delta_{g0}) \cos(\delta_{pcc0} - \delta_{g0}) + 2KU_{ref0} U_{g0} A_5 \\ & A_1 = [U_{ref0}^2 + U_{g0}^2 - 2U_{ref0} U_{g0} \cos(\delta_{ref0} - \delta_{g0})] \\ & A_2 = K \sin(\delta_{ref0} - \delta_{g0}) \sin(2\delta_{pcc0} - 2\delta_{g0}) \\ & A_3 = U_{ref0} U_{g0} K \cos(\delta_{ref0} - \delta_{g0}) \sin(2\delta_{pcc0} - 2\delta_{g0}) \\ & A_4 = 2U_{ref0} U_{g0} K \sin(\delta_{ref0} - \delta_{g0}) \cos(2\delta_{pcc0} - 2\delta_{g0}) \\ & A_5 = \cos(\delta_{ref0} - \delta_{g0}) \cos(\delta_{pcc0} - \delta_{g0}) \sin(\delta_{pcc0} - \delta_{g0}) - \sin(\delta_{ref0} - \delta_{g0}) \sin(\delta_{pcc0} - \delta_{g0}) \sin(\delta_{pcc0} - \delta_{g0}) + \sin(\delta_{ref0} - \delta_{g0}) \cos(\delta_{pcc0} - \delta_{g0}) \cos(\delta_{pcc0} - \delta_{g0}) \end{aligned} \quad (16)$$

式(14)可进一步整理得：

$$\left[\frac{K_3}{s} \Delta \omega + \frac{K_4}{s} \Delta \omega_{pcc} + \frac{K_5}{s} \Delta \omega_g \right] \omega_n = -K_1 \Delta U_{ref} - K_2 \Delta U_g \quad (17)$$

于是有：

$$\Delta \omega_{pcc} = \frac{(-sK_1 \Delta U_{ref} - sK_2 \Delta U_g - K_3 \Delta \omega \omega_n - K_5 \Delta \omega_g \omega_n)}{K_4 \omega_n} \quad (18)$$

当 K_1 、 K_2 为零， $\Delta \delta_{ref} = \Delta \delta_g$ 时，必有 $\Delta \delta_{pcc} = \Delta \delta_{ref} = \Delta \delta_g$ ，因此 $K_3 + K_4 + K_5 = 0$ 恒成立。

2.3 计及一次调频与附加阻尼环节等多控制环节的 VSG 调频小信号模型

上述两种模型分别建立了无功下垂控制下 VSG 有功-功角、固有网架下 VSG-PCC-系统频率微

增量之间的小信号关系。本节在其基础上,进一步融合一次调频与附加阻尼等多控制环节,提出VSG调频小信号模型。

式(1)在稳态点小信号线性化可得:

$$\Delta P_E + D\Delta\omega + sT_j\Delta\omega + K_\omega\Delta\omega_{pcc} + K_G(\Delta\omega - \Delta\omega_{pcc}) = 0 \quad (19)$$

$$\Delta\delta = (\Delta\omega - \Delta\omega_g)\omega_n/s \quad (20)$$

将式(7)、(9)、(18)代入式(19),并忽略电网电压的变化,并计及式(20),可进一步得到 $\Delta\omega_g$ 、 $\Delta\omega$ 之间关系 $G_{\omega G}$ 为

$$G_{\omega G} = \Delta\omega/\Delta\omega_g = \{K_4K_\delta\omega_n + s[-(K_\omega - K_G)K_1K_{u\delta} + (K_\omega - K_G)K_5]\} / \{K_4T_js^2\Delta\omega + [K_4D - (K_\omega - K_G) \cdot K_1K_{u\delta} - (K_\omega - K_G)K_3 + K_4K_G]s + K_4K_\delta\omega_n\} \quad (21)$$

将式(21)代入式(18),可得 $\Delta\omega_g$ 、 $\Delta\omega_{pcc}$ 之间的关系 $G_{\omega pcc}$ 为

$$\left\{ \begin{aligned} G_{\omega pcc} &= \frac{\Delta\omega_{pcc}}{\Delta\omega_g} = \frac{(-sK_1\Delta U_{ref} - sK_2\Delta U_g - K_3\Delta\omega\omega_n - K_5\Delta\omega_g\omega_n)}{K_4\omega_n\Delta\omega_g} = \\ &= \frac{(-sK_1K_{u\delta}(G_{\omega G}\Delta\omega_g - \Delta\omega_g)\frac{\omega_n}{s} - K_3G_{\omega G}\Delta\omega_g\omega_n - K_5\Delta\omega_g\omega_n)}{K_4\omega_n\Delta\omega_g} = \\ &= \frac{(-K_1K_{u\delta}(G_{\omega G} - 1) - K_3G_{\omega G} - K_5)}{K_4} = \\ G_{\omega G} &= \frac{-K_1K_{u\delta} - K_3}{K_4} + \frac{K_1K_{u\delta} - K_5}{K_4} \end{aligned} \right. \quad (22)$$

将式(7)、(9)、(21)、(22)代入式(19)并进行整理,可得 $\Delta\omega_g$ 、 ΔP_E 之间关系 G_P 为

$$\left\{ \begin{aligned} G_P &= \frac{\Delta P_E}{\Delta\omega_g} = -G_{\omega G}(T_js + D) - \frac{K_\omega\Delta\omega_{pcc}}{\Delta\omega_g} - \\ &= \frac{K_G(\Delta\omega - \Delta\omega_{pcc})}{\Delta\omega_g} = -G_{\omega G}(T_js + D) - \\ &= \frac{(K_\omega - K_G)G_{\omega pcc}\Delta\omega_g}{\Delta\omega_g} - \frac{K_GG_{\omega G}\Delta\omega_g}{\Delta\omega_g} = \\ &= -G_{\omega G}[T_js + D - (K_\omega - K_G)\frac{K_1K_{u\delta} + K_3}{K_4} + K_G] - \\ &= (K_\omega - K_G)\frac{K_1K_{u\delta} - K_5}{K_4} \end{aligned} \right. \quad (23)$$

3 VSG 型构网变流器调频能力可行域

为了定量的刻画与表征 VSG 型构网变流器调频能力的强弱程度,本节在融合多控制环节的 VSG

型构网变流器调频小信号模型基础上,进一步提出调频能力可行域的概念。式(21)为一典型二阶传递函数,可求得其特征根为

$$s_{1,2} = \frac{-(D_G) \pm j\sqrt{D_G^2 - 4K_4T_jK_\delta\omega_n}}{2K_4T_j} \quad (24)$$

其中:

$$D_G = K_4(K_G + D) - (K_\omega - K_G)K_1K_{u\delta} - (K_\omega - K_G)K_3 \quad (25)$$

阻尼比 ξ 、自然频率 ω_k 及根的虚部 $\xi\omega_k$ 为

$$\left\{ \begin{aligned} \xi &= D_G / (2K_4\sqrt{T_jK_\delta\omega_n}) \\ \omega_k &= \sqrt{K_\delta\omega_n/T_j} \\ \xi\omega_k &= -D_G / (2K_4T_j) \end{aligned} \right. \quad (26)$$

依据经典控制理论,为抑制系统超调,二阶系统最佳阻尼比应在 0.707~1 范围内。并且,为了保证系统的稳定裕度,系统特征根应距离虚轴应在 5~10 范围内^[5]。即:

$$\left\{ \begin{aligned} 0.707 < \xi &= \frac{D_G}{2K_4\sqrt{T_jK_\delta\omega_n}} < 1 \\ -10 < \xi\omega_k &= -\frac{D_G}{2K_4T_j} < -5 \end{aligned} \right. \quad (27)$$

依据相关行业规程^[21-23],VSG 的惯性时间常数 T_j 宜为 4~16 s,构网型储能变流器有功调频死区的绝对值宜在 0.03~0.05 Hz,有功调频系数 K_ω 宜为 20~50,有功响应允许误差应在 $\pm 2\%P_N$ 以内,电化学储能系统可以在 49.5~50.5 Hz 范围内正常运行,在 48~49.5、50.5~51 Hz 范围内至少运行 30 min。于是,VSG 固有阻尼 D 范围应满足式(28)。

$$D \leq 2\%P_N / \Delta f \quad (28)$$

考虑到规程中规定的 VSG 能正常运行的电网频率范围为 49.5~50.5 Hz,因此 D 应不大于 2 pu,而在极端情况应不大于 0.52 pu,在本文中, D 取 0.2 pu。

短路比指标(short circuit ratio, SCR)常被用来衡量交流侧系统的强弱,一般认为,对于极弱系统, $S_{CR} < 2.0$;对于弱系统, $2.0 < S_{CR} < 3.0$;对于强系统, $S_{CR} > 3.0$ ^[24]。本文中 S_{CR} 用来衡量机端出口处与电网之间的强弱关系,表达式如下:

$$S_{CR} = S_{ac} / P_N = U_N^2 / (P_N \cdot X_{\Sigma N}) \approx 1 / X_{\Sigma} \quad (29)$$

式中 S_{ac} 、 P_N 、 $X_{\Sigma N}$ 分别为机端出口处的短路容量、VSG 额定功率及机端与交流系统之间的等值电抗有名值。根据式(26)、(27)可分别求出满足阻尼比约

束与特征方程根虚部约束的区域 S_{ξ} 、 $S_{\xi\omega_k}$ ，如图 2 所示。

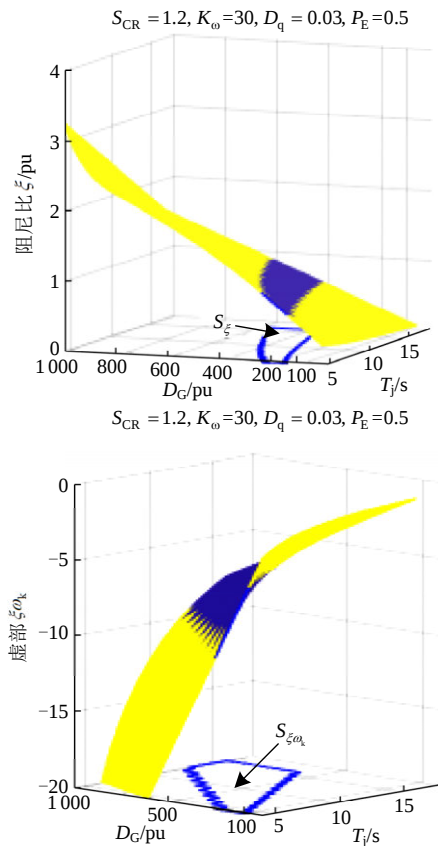


图 2 调频能力可行域示意图

Fig. 2 Feasible domain of frequency modulation capability

阻尼比约束区域 S_{ξ} 与特征方程根虚部约束区域 $S_{\xi\omega_k}$ 的交集，就是所谓的 VSG 型构网变流器调频能力可行域。

图 3 分别比较了不同有功调频系数 K_{ω} 、电网强度 S_{CR} 、VSG 出力 P_E 及无功下垂系数 D_q 下 VSG 调频能力可行域的变化情况，可以得到如下结论：

1) 有功调频系数 K_{ω} 在增加 VSG 调频出力的同时，也在一定程度上增加了 VSG 的阻尼特性，因此，工况允许的情况下，有功调频系数 K_{ω} 应尽量取值 50。

2) S_{CR} 减小过程中，采用附加阻尼控制的 VSG 调频能力可行域会向左上方偏移，并且可行域范围逐渐减小。原因在于 PCC 处频率会随着电网强度的弱化而愈趋近于 VSG 频率而偏离系统频率，导致附加阻尼效果弱化。

3) VSG 有功出力的增加会恶化 VSG 调频特性，导致调频能力可行域变小。无功下垂系数 D_q 对 VSG 调频能力可行域影响较小。

4) 很难找到一组控制参数使得 VSG 在有功调

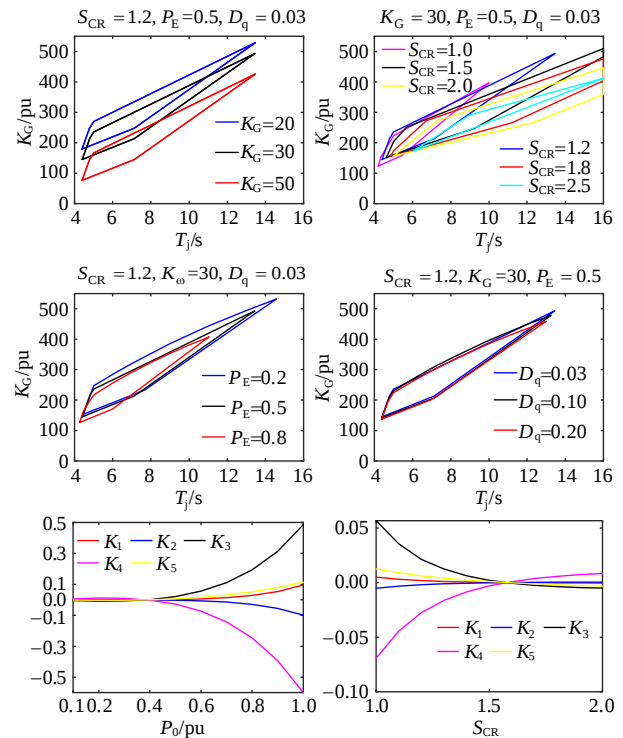


图 3 控制参数变化时 VSG 调频能力可行域变化情况

Fig. 3 Change of feasible domain of VSG frequency modulation capability when control parameters change

频系数 K_{ω} 、 S_{CR} 变化时仍能够保持很强的构网调频能力。电网强度 S_{CR} 、有功出力、有功调频系数 K_{ω} 变化时，惯性时间常数、附加阻尼应尽量取值在可行域的公共区域，在场景变动下 VSG 面临公共可行域变小甚至没有、电网强度难以准确评估所导致的 VSG 控制参数整定难度增大的困境。

5) 极弱电网下受限于 VSG 的有功传输极限，VSG 会面临调频过程中有功超调过大所导致的出力超过有功传输极限、无法完成频率穿越的情况。因此，提升极弱电网下的调频能力有助于提升 VSG 功角稳定性。

4 弱、极弱电网场景下基于灵活调速控制的 VSG 型构网变流器调频能力提升策略

为解决弱、极弱电网下 VSG 调频能力受控制参数、电网强度制约以及电网信息不明确时调频能力可行域难以计算的问题，本文提出一种基于灵活调速控制的 VSG 调频能力提升策略，其具有使用固定参数便可获得调频能力自适应增强、工程上易于实现等优势，详细的控制框图如图 4 所示。

VSG 正常运行时惯性时间常数取值 T_{f_nom} ，附加阻尼取值 K_{G_nom} 。灵活调速阶段，通过引入调频信号 P_{ω} 与实际 VSG 出力 P_E 的偏差，并对其进行相应的控制，进而使 VSG 能够自适应、灵活的修正

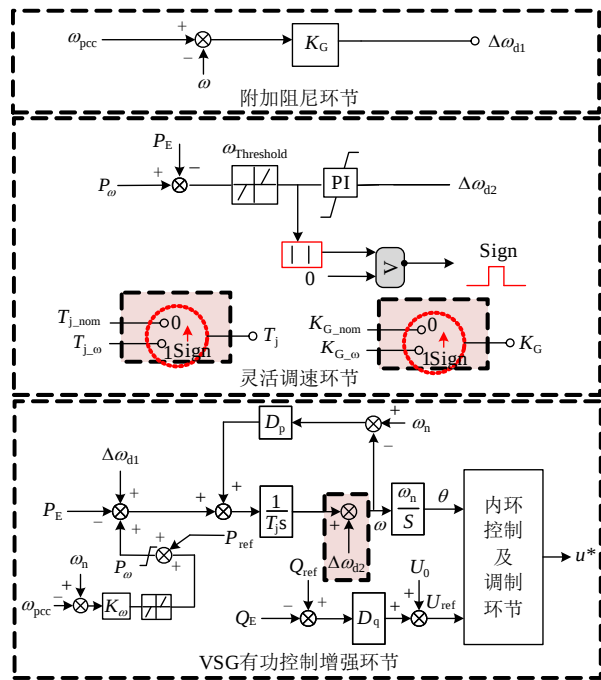


图 4 弱、极弱电网下 VSG 调频能力提升策略控制框图

Fig. 4 VSG frequency modulation capability enhancement strategy control block diagram under extremely weak grid

自身的虚拟转速，以达到出力跟踪调频信号、抑制调频过程中有功超调的效果。为了避免惯性环节与阻尼环节对灵活调速的影响，在灵活调速阶段惯量时间常数 $T_{j\omega}$ 应尽可能的减小。本文中，灵活调速阶段惯量时间常数 $T_{j\omega}$ 取值 0.2 s，在减小惯量的同时，为了避免控制上出现过阻尼特性，附加阻尼 $K_{G\omega}$ 应当适量减少， $K_{G\omega}$ 选取 50 pu。同时为了避免频繁的调速，设置死区环节并设定灵活调速阈值 $\omega_{\text{Threshold}}$ ，当调频信号 P_ω 与实际 VSG 出力 P_E 的偏差大于 $\omega_{\text{Threshold}}$ 时，在产生灵活调速标志 Sign 的同时，偏差通过 PI 控制器产生调速变量 $\Delta\omega_{d2}$ ，叠加到虚拟转速位置，实现对虚拟转速的灵活调节。灵活调速标志 Sign 用于惯性时间常数、附加阻尼正常运行与灵活调速阶段运行数值的切换。充分利用 VSG 灵活可调的优势，在调频的初期进行惯量支撑，在调频的中后期采用灵活调速环节对有功超调进行有效抑制，以达到弱、极弱电网下 VSG 调频能力提升的效果。正常运行时，所提策略不会改变原有 VSG 的控制性能，并且控制环节相对较少，工程上易于实现，场景变动时适用度相对较高。

5 仿真算例

5.1 仿真设置

本文采用表 1 参数在 PSCAD/EMTDC 中构建仿真，系统拓扑如图 5 所示，分别对 VSG 调频能

力可行域及弱、极弱电网下 VSG 调频能力提升策略在正常、极端调频场景下的有效性进行仿真验证。

表 1 VSG 仿真系统主要参数

Table 1 Parameters of VSG in simulation

参数名称	数值
单机额定容量/MW	2
交流测额定线电压/kV	0.69
滤波电容/pu	0.05
交流侧滤波器电感/pu	0.1
台数/台	50
主变短路阻抗/pu	0.12
箱变短路阻抗/pu	0.06
电网等值阻抗/pu	0.32、0.65
惯性(正常)/s	8
阻尼系数/pu	0.2
附加阻尼系数(正常)/pu	200、100
惯性(灵活调速)/s	0.2
附加阻尼系数(灵活调速)/pu	50
无功功率下垂系数/pu	0.03
电压外环比例、积分时间常数	5、0.3
电流内环比例、积分时间常数	2、0.01
一次调频死区/Hz	0.03
有功调频系数/pu	20、30、50
灵活调速阈值/pu	0.01
灵活调速环节比例、积分时间常数	1、0.01
一次调频环节限幅/pu	1、1

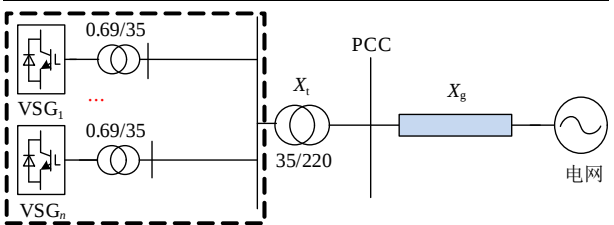


图 5 VSG 仿真系统示意图

Fig. 5 Diagram of VSG simulation mode system

5.2 VSG 调频能力可行域仿真验证

VSG 在正常运行时输出功率为 0.5 pu，1 s 时电网频率下降 0.5 Hz，并于 4 s 时恢复，RoCoF 设置为 1 Hz/s，进行 K_ω 分别为 20、30、50， S_{CR} 分别为 1.2、2.0 场景的仿真，利用式(21)—(23)进行计算及仿真测试，记录 VSG 功率、角频率及 PCC 处频率的响应曲线，如图 6、7 所示。

由图 6 可知，计算曲线略偏小于仿真曲线，验证了本文所提出的融合多控制 VSG 调频小信号模型的有效性。同时，随着有功调频系数 K_ω 的增加，VSG 有功出力增加的同时，有功功率的超调逐渐减少，VSG 调频能力逐步增加。 K_ω 取值 20 时，VSG 有功超调最大，达到了 50%。

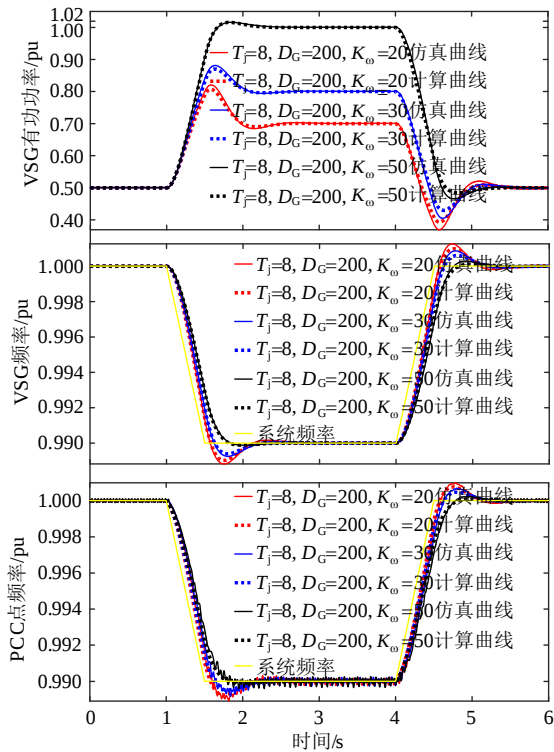


图6 $S_{CR}=1.2$ 时 VSG 调频过程中相关变量曲线图
Fig. 6 Curve of correlated variables in VSG frequency modulation when $S_{CR}=1.2$

由图 7 可知：当电网强度变强时，尽管 VSG 附加阻尼系数减少了一半，并处于调频能力可行域外，不同 K_ω 取值下 VSG 调频阶段有功超调较极弱

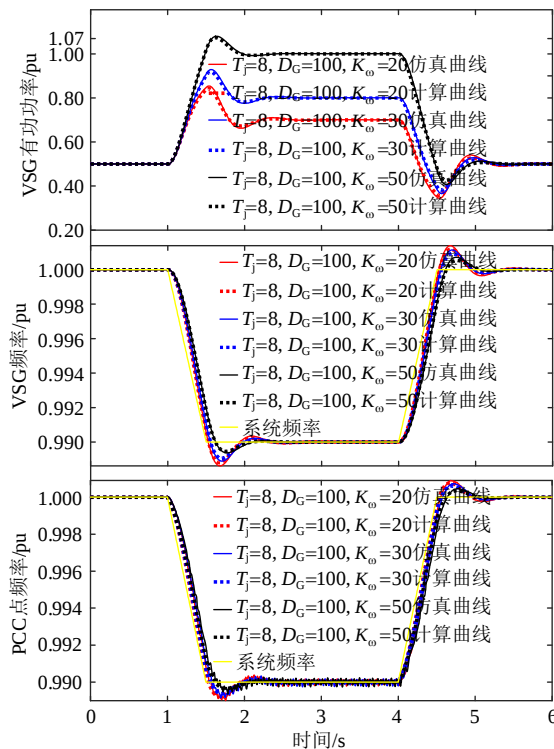


图7 $S_{CR}=2.0$ 时 VSG 调频过程中相关变量曲线图
Fig. 7 Curve of correlated variables in VSG frequency modulation when $S_{CR}=2.0$

电网场景只是略有增加，约为 0.05 pu，VSG 调频效果并没有明显恶化，说明附加阻尼的阻尼效果与网络强度呈正相关特性，即：网越弱，附加阻尼效果越弱；网越强，附加阻尼效果越强。归其原因，在于弱网下 PCC 处频率会随着电网强度的弱化愈趋近于 VSG 频率而偏离系统频率，导致附加阻尼效果弱化。

5.3 弱、极弱电网下 VSG 调频能力提升策略有效性仿真验证

为验证本文所提出的弱、极弱电网下 VSG 调频能力提升策略的有效性，分别针对 5.2 节的仿真场景进行固定参数、经典参数自适应策略以及灵活调速策略的仿真对比，如图 8、9 所示。VSG 功率、角频率及 PCC 点处频率曲线以及灵活调速策略的相关变量如图 10 所示。

由图 8、9 可知，不同电网强度、不同有功调频系数下，本文所提出的灵活调速策略均能有效抑制有功的超调，经典参数自适应策略对有功的超调的抑制有一定效果，但是并不能完全抑制超调现象，并且在 $S_{CR}=1.2$ 、 $K_\omega=50$ 时出现了过阻尼现象。

由图 10 可知，在调频的初期，灵活调速策略并没有启动，此时 VSG 向系统提供一定的惯量支撑，在调频开始后大概 0.1s，灵活调速策略启动，开始对 VSG 进行灵活调速进而对有功超调进

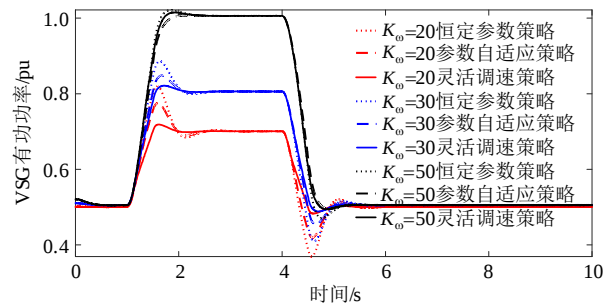


图8 $S_{CR}=1.2$ 时 VSG 不同调频策略的仿真对比图
Fig. 8 Simulation comparison of VSG under different frequency modulation strategies when $S_{CR}=1.2$

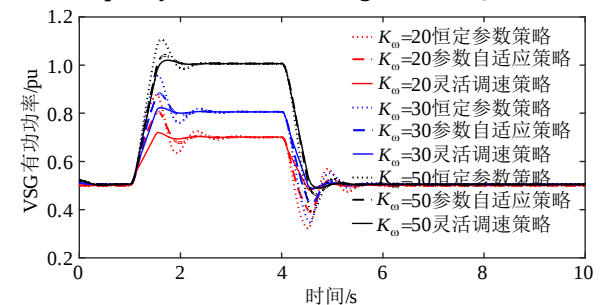


图9 $S_{CR}=2.0$ 时 VSG 不同调频策略的仿真对比图
Fig. 9 Simulation comparison of VSG under different frequency modulation strategies when $S_{CR}=1.8$

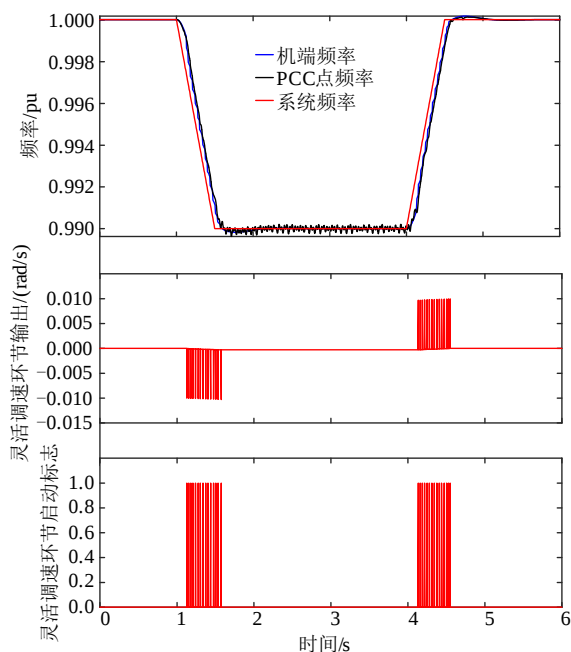


图10 正常调频场景下灵活调速策略相关变量曲线图

Fig. 10 Curve of correlated variables under flexible speed modulation strategy under normal FC

行有效抑制。

针对规程中“系统频率 48 Hz 时, 仍能运行 30 min”极端场景, 分别进行 3 种策略在 $S_{CR}=1.2$ 的对比仿真, 如图 11, 此种场景的 VSG 功率、角频率及 PCC 点处频率曲线以及灵活调速策略的相关变量如图 12。由图 11、12 可知, 电网频率下降 2 Hz 时, 采用固定参数及经典参数自适应策略的 VSG 均发生有功出力超出有功传输极限的现象, 导致 VSG 功角失稳、无法实现频率穿越, 而本文所提出的灵活调速策略在此种极端场景下仍然能够有效地将 VSG 有功功率控制在额定值, 说明本文所提出的弱、极弱电网下 VSG 调频能力提升策略的有效性。

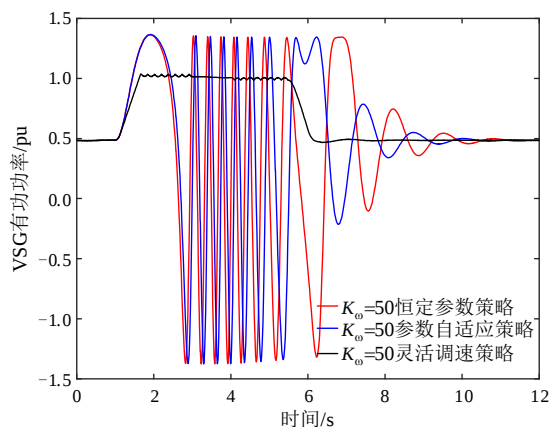


图11 极端调频场景下不同 VSG 调频策略仿真对比图

Fig. 11 Simulation comparison of VSG with different frequency modulation strategies under extreme condition

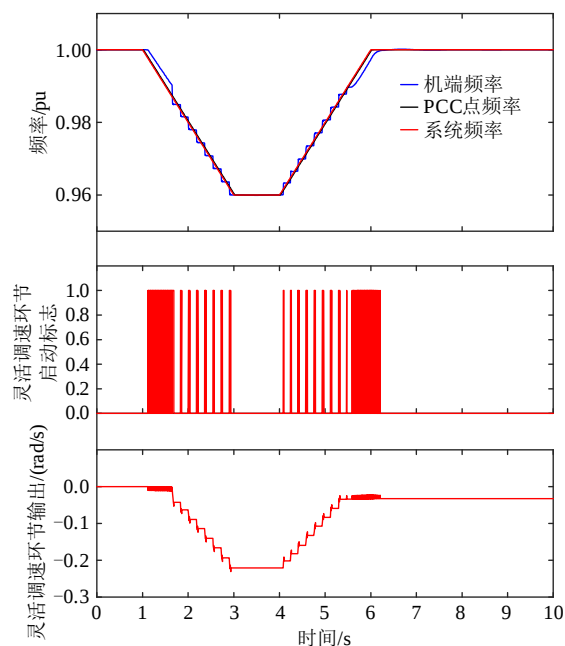


图12 极端调频场景下灵活调速策略相关变量曲线图

Fig. 12 Curve of correlated variables of flexible speed modulation strategy under extreme condition

5.4 弱、极弱电网下 VSG 多机并联时调频能力提升策略有效性仿真验证

为了验证所提策略在多机并联调频场景下的有效性, 将 50 台机组聚合成 2 组并联接入主变低压侧, 并采用自适应虚拟阻抗抑制环流技术^[25], 分别进行正常、极端调频两种场景下的仿真, 如图 13、14 所示。正常调频场景下, 两组 VSG 均按照 $K_o=20$ 进行调频, 在这过程中两组 VSG 均没有出现超调现象, 灵活调速策略也同样没有影响到并联 VSG 的稳定性。极端调频场景下, 两组 VSG 均按照 $K_o=50$ 进行调频, 在这过程中, 尽管初始功率不同, 最终在灵活调速策略控制下两组 VSG 将出力限制在 1 pu 处, 没有出现功角失稳的现象, 说明了本文所提策略在多机并联调频场景下的有效性。

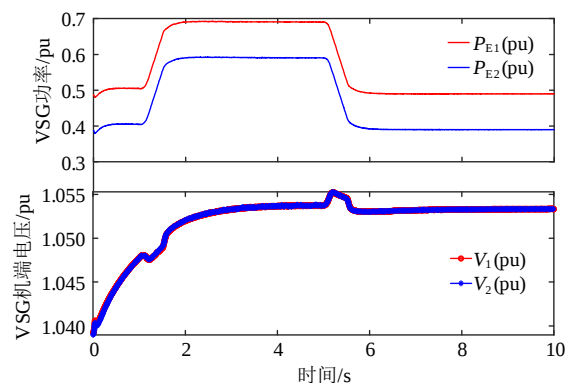


图13 正常调频、灵活调速策略下并联 VSG 变量曲线图

Fig. 13 Curve of variables of VSG in parallel with flexible speed modulation strategy under normal condition

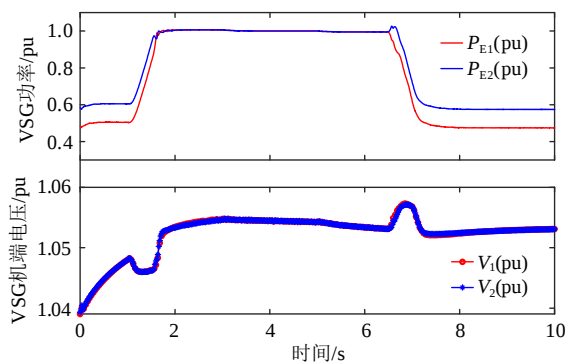


图 14 极端调频、灵活调速策略下并联 VSG 变量曲线图

Fig. 14 Curve of variables of VSG in parallel with flexible speed modulation strategy under extreme condition

6 结论

本文在现有 VSG 控制方法的基础上, 通过理论推导并建立了 VSG 型构网变流器调频小信号模型, 定量分析了虚拟惯量、附加阻尼系数对于 VSG 动态性能的影响, 并结合经典控制理论进一步提出调频能力可行域的概念, 用以定量刻画和度量虚拟惯量、附加阻尼在多工况、多场景下的选取范围。针对场景变换时 VSG 调频性能可能出现不足、电网强度不明确时控制参数难以整定的问题, 提出了一种基于灵活调速控制的 VSG 调频能力提升策略, 使其控制性能均能维持在一个最佳的状态, 其具有选取固定参数便可获得调频能力自适应增强的效果、工程上易于实现等优势。最后在 PSCAD/EMTDC 构建仿真, 分别对 VSG 调频能力可行域及弱、极弱电网下 VSG 调频能力提升策略在正常、极端调频时的有效性进行了仿真验证, 结果表明, 所提控制策略有助于 VSG 在弱、极弱电网下实现多工况、多场景下暂态性能、调频能力的有效提升。

参考文献

- [1] 秦世耀, 齐琛, 李少林, 等. 电压源型构网风电机组研究现状及展望[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(4): 1314-1334.
QIN Shiyao, QI Chen, LI Shaolin, et al. Review of the voltage-source grid forming wind turbine[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(4): 1314-1334(in Chinese).
- [2] 吴林林, 赵伟, 徐曼, 等. 考虑风电机组故障穿越特性的电压反复波动机理分析与抑制[J]. 全球能源互联网, 2022, 5(3): 290-297.
WU Linlin, ZHAO Wei, XU Man, et al. Mechanism analysis and suppression of repeated voltage fluctuation considering fault ride through characteristics of the wind turbine[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2022, 5(3): 290-297(in Chinese).
- [3] 詹长江, 吴恒, 王雄飞, 等. 构网型变流器稳定性研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(6): 2339-2358.
ZHAN Changjiang, WU Heng, WANG Xiongfei, et al. An overview of stability studies of grid-forming voltage source converters[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(6): 2339-2358(in Chinese).
- [4] 秦晓辉, 苏丽宁, 迟永宁, 等. 大电网中虚拟同步发电机惯量支撑与一次调频功能定位辨析[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(9): 36-43.
QIN Xiaohui, SU Lining, CHI Yongning, et al. Functional orientation discrimination of inertia support and primary frequency regulation of virtual synchronous generator in large power grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(9): 36-43(in Chinese).
- [5] 赵炳洋, 赵波, 胡娟, 等. 考虑 VSG 构网储能暂态与稳态优化的自适应策略[J]. 高压电器, 2023, 59(7): 39-47.
ZHAO Bingyang, ZHAO Bo, HU Juan, et al. Adaptive strategy considering transient and steady-state optimization of VSG grid-forming energy storage[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(7): 39-47(in Chinese).
- [6] 张林, 张海波, 蒋维勇, 等. 基于自适应动态虚拟同步阻抗的虚拟同步机功率解耦策略[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(15): 6010-6023.
ZHANG Lin, ZHANG Haibo, JIANG Weiyong, et al. Power decoupling strategy for virtual synchronous generator based on adaptive dynamic virtual synchronous impedance[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(15): 6010-6023(in Chinese).
- [7] SONG Zhenhao, ZHANG Jianduo, TANG Fen, et al. Small signal modeling and parameter design of virtual synchronous generator to weak grid[C]//Proceedings of the 2018 13th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications(ICIEA). Wuhan: IEEE, 2018: 2618-2624.
- [8] LI Chang, YANG Yaqian, CAO Yijia, et al. Frequency and voltage stability analysis of grid-forming virtual synchronous generator attached to weak grid[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2022, 10(3): 2662-2671.
- [9] D'ARCO S, SUUL J A, FOSSO O B. Control system tuning and stability analysis of virtual synchronous machines[C]//2013 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition. Denver: IEEE, 2013: 2664-2671.
- [10] GUO Jian, CHEN Yandong, WANG Lei, et al. Impedance analysis and stabilization of virtual synchronous generators with different DC-link voltage controllers under weak grid[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36(10): 11397-11408.
- [11] ALIPOOR J, MIURA Y, ISE T. Power system stabilization using virtual synchronous generator with alternating moment of inertia[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2015, 3(2): 451-458.

- [12] 温春雪, 陈丹, 胡长斌, 等. 微网逆变器的 VSG 转动惯量和阻尼系数自适应控制[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(17): 120-126, 183.
WEN Chunxue, CHEN Dan, HU Changbin, et al. Self-adaptive control of rotational inertia and damping coefficient of VSG for converters in a microgrid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(17): 120-126, 183(in Chinese).
- [13] 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.
ZOU Peigen, MENG Jianhui, WANG Yi, et al. Influence analysis of the main control parameters in FVSG on the frequency stability of the system[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(4): 1335-1342(in Chinese).
- [14] MOHAMMED N, RAVANJI M H, ZHOU Weihua, et al. Online grid impedance estimation-based adaptive control of virtual synchronous generators considering strong and weak grid conditions[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2023, 14(1): 673-687.
- [15] 徐海珍, 张兴, 刘芳, 等. 基于超前滞后环节虚拟惯性的 VSG 控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(7): 1918-1926.
XU Haizhen, ZHANG Xing, LIU Fang, et al. Virtual synchronous generator control strategy based on lead-lag link virtual inertia[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(7): 1918-1926(in Chinese).
- [16] 王亚维, 刘邦银, 段善旭, 等. 虚拟同步控制的暂态特性优化策略研究[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(20): 5885-5893.
WANG Yawei, LIU Bangyin, DUAN Shanxu, et al. Research on transient characteristic optimization of virtual synchronization generator control strategy[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(20): 5885-5893(in Chinese).
- [17] XIONG Xiaoling, WU Chao, HU Bin, et al. Transient damping method for improving the synchronization stability of virtual synchronous generators[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36(7): 7820-7831.
- [18] 王吉利, 占领, 张钢, 等. 提高构网型储能系统功角稳定性的附加阻尼方法[J]. 电力科学与技术学报, 2023, 38(4): 75-81, 103.
WANG Jili, ZHAN Ling, ZHANG Gang, et al. Additional damping method for improving the power angle stability of grid-forming energy storage system[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2023, 38(4): 75-81, 103(in Chinese).
- [19] HUANG Linbin, XIN Huanhai, WANG Zhen, et al. Transient stability analysis and control design of droop-controlled voltage source converters considering current limitation[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(1): 578-591.
- [20] SUN Kun, YAO Wei, WEN Jinyu, et al. A two-stage simultaneous control scheme for the transient angle stability of VSG considering current limitation and voltage support[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2022, 37(3): 2137-2150.
- [21] 国家能源局. DL/T 2246.7—2021 电化学储能电站并网运行与控制技术规范 第7部分: 惯量支撑与阻尼控制[J]. 北京: 中国电力出版社, 2021.
National Energy Administration. DL/T 2246.7—2021 Technical specification for grid-connected operation and control of electrochemical energy storage station—part 7: inertia support and damping control[J]. Beijing, China: China Electric Power Press, 2021(in Chinese).
- [22] 国家能源局. DL/T 2246.2—2021 电化学储能电站并网运行与控制技术规范 第2部分: 并网运行[J]. 北京: 中国电力出版社, 2021.
National Energy Administration. DL/T 2246.2—2021 Technical specification for grid-connected operation and control of electrochemical energy storage station—part 2: integration and operation[J]. Beijing, China: China Electric Power Press, 2021(in Chinese).
- [23] 中关村储能产业技术联盟. 《构网型储能变流器技术规范》征求意见稿[R]. 北京: 中关村储能产业技术联盟, 2023.
China Energy Storage Alliance. Technical specification for grid-forming power conversion system[R]. Beijing, China: China Energy Storage Alliance, 2023(in Chinese).
- [24] 管霖, 陈兴望, 雷晟, 等. 多馈入短路比指标的适用范围及其与直流最大传输功率的关系探讨[J]. 电网技术, 2017, 41(3): 691-697.
GUAN Lin, CHEN Xingwang, LEI Sheng, et al. Study on applicability of multi-infeed short circuit ratio and its relationship with maximum HVDC available power[J]. Power System Technology, 2017, 41(3): 691-697(in Chinese).
- [25] 温春雪, 黄耀智, 胡长斌, 等. 虚拟同步发电机接口变换器并联运行虚拟阻抗自适应控制[J]. 电工技术学报, 2020, 35(S2): 494-502.
WEN Chunxue, HUANG Yaozhi, HU Changbin, et al. Adaptive control of virtual impedance in parallel operation of virtual synchronous generator interface converter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(S2): 494-502(in Chinese).

收稿日期: 2024-03-25。

作者简介:

赵冬梅(1965), 女, 教授, 博士生导师, 主要从事电力系统分析与控制、新能源发电与智能电网等方面的研究工作, zhao-dm@ncepu.edu.cn;



赵冬梅

*通信作者: 裴建楠(1988), 男, 博士研究生, 主要研究方向为储能机理建模及构网能力提升技术, 513158450@qq.com。

(责任编辑 邱丽萍)