

提高构网型储能系统功角稳定性的 附加阻尼方法

王吉利¹, 占领², 张钢¹, 胡彬², 柯贤波¹, 程林¹, 年珩²

(1. 国家电网有限公司西北分部, 陕西 西安 710048; 2. 浙江大学电气工程学院, 浙江 杭州 310027)

摘要: 虚拟同步发电机(VSG)技术是一种被广泛应用的构网型储能控制策略。然而, 由于模拟同步发电机外特性导致的非线性功角关系, VSG与同步发电机类似, 在严重扰动下容易与电网失去同步。为此, 分析并网VSG的大信号功角稳定性, 提出一种提高功角稳定性的附加阻尼方法, 该方法是一种将线性化模型与非线性化模型相结合的理论分析方法。采用线性化模型对阻尼比和频率变化率(RoCoF)进行定性分析, 说明附加阻尼方法可以在不降低频率稳定性的前提下提高功角稳定性; 在此基础上, 采用非线性化模型进行定量分析以准确评估电网故障后VSG的功角稳定性。理论分析和仿真验证表明, 在有功功率控制回路中, 引入附加阻尼可以提高VSG的功角稳定性。

关键词: 虚拟同步机; 附加阻尼; 功角稳定性; 频率稳定性

DOI: 10.19781/j.issn.1673-9140.2023.04.008 中图分类号: TM46 文章编号: 1673-9140(2023)04-0075-07

Additional damping method for improving the power angle stability of grid-forming energy storage system

WANG Jili¹, ZHAN Ling², ZHANG Gang¹, HU Bin², KE Xianbo¹, CHENG Lin¹, NIAN Heng²

(1. Northwest Branch of State Grid Corporation of China, Xi'an 710048, China; 2. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: Virtual synchronous generator (VSG) is a widely used grid-forming control strategy. However, due to the nonlinear power angle relationship caused by the analog of external characteristics of synchronous generators, VSG is similar to synchronous generators and is prone to lose synchronization with the power grid under severe disturbances. This paper analyzes the large signal power angle stability of grid-connected VSG, and an additional damping method to improve the power angle stability is proposed, the method is a theoretical analysis method combining the linearized model with the nonlinearized model. Firstly, the linearized model is used to qualitatively analyze the damping ratio and the rate of change of frequency (RoCoF), which shows that the additional damping method can improve the power angle stability without reducing the frequency stability. On this basis, the nonlinear model is used for quantitative analysis to accurately evaluate the power angle stability of VSG after a power grid fault. Theoretical analysis and simulation show that adding additional damping into the active power control loop can improve the power angle stability of VSG.

Key words: virtual synchronous generator; additional damping; power angle stability; frequency stability

收稿日期: 2022-07-05; 修回日期: 2022-12-08

基金项目: 国家电网有限公司西北分部科技项目(SGNW0000DKJS2200112)

通信作者: 年珩(1978—), 男, 博士, 教授, 主要从事新能源并网运行与控制技术研究; E-mail: nianheng@zju.edu.cn

电压源变流器(voltage source converter, VSC)广泛应用于储能领域,以连接储能电站和常规电网。随着接入电网储能设备的日益增加,同步发电机的比例持续降低,导致电网惯性减小,这使得公共耦合点(point of common coupling, PCC)处的电压和频率很容易受到干扰。基于传统矢量控制的变流器几乎没有转动惯量,因而无法为电网提供稳定的支撑,也无法替代同步机为电网提供惯性和阻尼^[1-4]。如果大量接入电网的储能电站以传统矢量控制策略对并网变流器进行控制,势必导致电网运行安全稳定性的下降。因此,在这种背景下要求VSC采用构网型控制策略,起到支撑电网电压和频率的作用^[5]。最常用的构网型控制策略是 P - f 和 Q - V 下垂控制,但由于缺乏合成惯性,下垂控制在大扰动期间会出现较大的频率偏差和较高的频率变化率(rate of change of frequency, RoCoF)^[6],这可能会对电力系统的频率稳定性造成很大威胁。因此,需要在下垂控制中添加虚拟惯性,以减少频率偏差,虚拟同步机(virtual synchronous generator, VSG)控制策略可以满足这一要求。文献[7]提出了一种使变流器呈现电压源特性的虚拟同步机控制策略,改进了储能电站的并网性能,从而为电网提供所需的电压与频率支撑^[8-9]。因此,本文将研究基于VSG控制策略的VSC。

根据扰动的大小,VSG稳定性问题可分为2类:小信号稳定性和大信号功角稳定性^[10]。大量的研究工作致力于进行小信号稳定性分析^[11-12],通过在平衡工作点附近对系统进行线性化来评估系统的小信号稳定性。线性化模型可以提供直观的理解,更好地理解失去稳定性的机制,然而,如果工作点因大扰动发生改变,则线性化模型就不再适用。虽然可以在新的平衡工作点上再次进行线性化处理,但仅仅通过小信号分析方法无法保证系统在大扰动下的功角稳定性。文献[13]研究了4种不同类型的构网型储能控制策略,并将其分为非惯性响应和惯性响应,结果发现,惯性响应和功角稳定性之间存在冲突;文献[14]进一步提出了一种模式自适应的功角控制方法以提高功角稳定性,但求导运算在工程中很难实现。

因此,本文对描述电网故障期间保持与电网同

步能力的VSG功角稳定性展开研究,提出一种提高功角稳定性的附加阻尼方法,结合线性化和非线性化模型,表明在有功功率控制回路中,引入附加阻尼可以提高VSG的功角稳定性。

1 基于VSG的系统描述

1.1 VSG的动态描述

并网VSG的结构如图1所示, i_g 为注入电网的电流, P 、 Q 为注入电网的有功和无功功率, X_f 为VSG的输出滤波器电抗。内部电压回路用于调节PCC电压 V_{pcc} ,跟踪其参考值 $V_{pcc,ref}$, $V_{m,ref}$ 、 θ_{ref} 分别为 $V_{pcc,ref}$ 的幅值和相位角。由于本文主要关注的是VSG功角控制对功角稳定性的影响,因此,将电网建模为无限大母线电压 V_g 以及与其串联的等效阻抗(R_g+jX_g)。

VSG的直流侧电压由储能转换器控制,以平衡可再生能源的间歇性功率和电网所需功率。因此,在分析并网VSG与电网的相互作用时,可忽略储能荷电状态的变化情况,假设直流回路电压为常数。

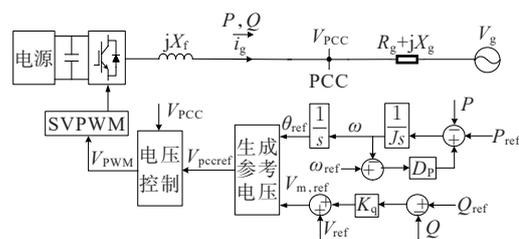


图1 并网VSG的结构

Figure 1 Diagram of a grid-connected VSG

在VSG控制方案中,相位参考 θ_{ref} 是通过有功功率控制回路产生的。根据图1,有功功率控制规律为

$$\omega = \frac{P_{ref} - P + D_p \omega_{ref}}{J_s + D_p} \quad (1)$$

式中, J_s 、 D_p 分别为虚拟惯性、阻尼系数; P_{ref} 、 P 分别为VSG的参考有功功率、输出有功功率; ω_{ref} 为参考角频率。

对式(1) ω 积分,即得相位参考 θ_{ref} 。电压幅值参考值 $V_{m,ref}$ 由无功功率控制回路产生:

$$V_{m,ref} = V_{ref} + K_q (Q_{ref} - Q) \quad (2)$$

式中, V_{ref} 为电压基准值; K_q 为无功下垂系数; Q_{ref} 、 Q 分别为VSG的参考无功功率、输出无功功率。

考虑外部功率控制回路的带宽通常比内部电压控制回路的带宽低得多^[15],VSG的功角稳定性主要由外部功率控制回路决定。在功角稳定性分析中,内部电压控制回路可以假设为单位增益,使PCC电压跟踪电压参考,即 $V_{pcc}=V_{pcc,ref}$ 。

定义 δ 为功角,即 V_{pcc} 和 V_g 之间的相位差,则 $\delta=\theta_{pcc}-\theta_g=\theta_{ref}-\omega_g t$ 。因此, P 、 Q 导出如下:

$$P=\frac{3}{2}[\alpha(V_{pcc}^2-V_{pcc}V_g\cos\delta)+\beta V_{pcc}V_g\sin\delta] \quad (3)$$

$$Q=\frac{3}{2}[\beta(V_{pcc}^2-V_{pcc}V_g\cos\delta)-\alpha V_{pcc}V_g\sin\delta] \quad (4)$$

其中, $\alpha=R_g/(R_g^2+X_g^2)$, $\beta=X_g/(R_g^2+X_g^2)$, V_g 、 V_{pcc} 分别是 V_g 、 V_{pcc} 的幅值。

将式(4)代入式(2),并考虑 $V_{pcc}=V_{m,ref}$,求解关于 V_{pcc} 的二次方程可以得到 V_{pcc} 和 δ 之间的显式关系;再联立该显式关系和式(3),可以绘制出描述VSG有功功率的 P - δ 曲线,如图2实线所示。这种 P 随着 δ 增加先单调增加再单调减小到零的非线性特性,是导致VSG失去功角稳定性的最根本原因。根据上述分析,可以得到VSG的等效分析框图,如图3所示。

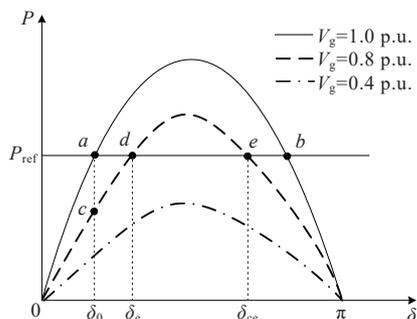


图2 不同电网电压跌落下的 P - δ 曲线

Figure 2 P - δ curves with different grid voltage sags

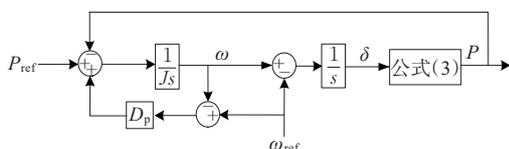


图3 VSG有功功率回路控制示意

Figure 3 Control diagram of the active power control loop of the VSG

1.2 功角稳定问题的类型

扰动前、后VSG的 P - δ 曲线见图2,稳态下VSG工作在平衡点 a ,此时 $P_{ref}=P^{[16-17]}$ (图2中实线)。根据扰动后系统是否存在平衡点,可以分为2种类型的功角稳定问题,这取决于电网电压跌落的

深度,图2中实线表示扰动前,虚线表示电网电压下降20%,点划线表示电网电压下降60%。点划线表示电网电压跌落后系统没有平衡点,此时仅仅通过改进控制策略无法提高功角稳定性,本文不对这种故障类型进行讨论。虚线表示电网电压跌落后存在平衡点, d 、 e 点分别代表扰动后的稳定和 unstable 平衡点。故障发生后系统工作点从 a 点变为 c 点,根据式(1),由于 $P_{ref}>P$,VSG的输出频率从 c 点增加到 d 点,称为加速区域;而由于 $P_{ref}<P$,VSG的输出频率从 d 点减小到 e 点,称为减速区域。若VSG的输出频率未能在 e 点之前恢复到电网频率,则VSG将跨过 e 点且输出频率将由于 $P_{ref}>P$ 而再次增加,从而导致系统失去功角稳定性。因此,功角 δ 超过 e 点对应的功角 δ_{cc} 是导致系统失去功角稳定性的直接原因。

2 在有功回路引入附加阻尼

为了不改变所需的稳态特性且不恶化频率响应特性,可以在有功回路增加附加阻尼环节以改善瞬态响应,提高系统的功角稳定性。通过反馈VSG和电网之间的频率差,将附加阻尼引入有功功率控制回路,如图4所示。由于系统处于稳态时与电网同步,虚拟角频率等于电网角频率,因此附加路径不会影响到VSG的稳态特性。

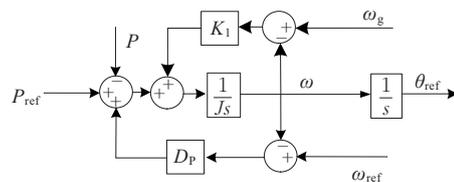


图4 有功功率控制回路引入附加阻尼

Figure 4 Active power control loop with additional damping

2.1 功角稳定性的定性分析

首先,采用线性化模型对系统功角稳定性进行定性分析。定义 $F(\delta)=V_{pcc}(\delta)\sin\delta$,忽略电网电阻 R_g ,围绕 d 点对图2中 P 和 δ 的关系进行线性化,即对式(3)进行线性化:

$$G_p = \frac{\hat{P}}{\hat{\delta}} = \frac{3V_g}{2X_g} F'(\delta) \quad (5)$$

其中, $(\hat{\cdot})$ 表示小的变化, G_p 为在 d 点计算 P 和 δ 间

的近似增益,其与系统参数有关,对于给定条件,这些参数是常数,因此, G_p 是常数且 $G_p > 0$ (因为 d 点切线斜率大于零)。

根据图3,当 P_{ref} 发生一个小扰动时, ω 的动态响应可以在 s 域中描述如下:

$$\frac{\hat{\omega}}{\hat{P}_{\text{ref}}} = \frac{s}{Js^2 + (D_p + K_1)s + G_p} \quad (6)$$

系统的阻尼比为

$$\zeta = \frac{D_p + K_1}{2\sqrt{JG_p}} \quad (7)$$

由于 G_p 在给定系统条件下是常数, ζ 由 D_p 、 K_1 和 J 确定,因此,较大的 D_p 、 K_1 和较小的 J 有望增加系统阻尼比,减少功角超调,从而提高功角稳定性。 D_p 作为VSG中的阻尼系数,通常根据电网规范设计总是设为固定值,以保证所需要的下垂特性。因此,可通过改变 J 和 K_1 来提高系统的功角稳定性。

假设功率参考存在阶跃变化(电网电压阶跃变化可等效为功率参考阶跃变化),其拉普拉斯变换为 $1/s$ 。因此,根据式(6), s 域中的频率响应可推导为

$$\hat{\omega} = \frac{s}{Js^2 + (D_p + K_1)s + G_p} \cdot \frac{1}{s} = \frac{1}{Js^2 + (D_p + K_1)s + G_p} \quad (8)$$

使用阻尼比和无阻尼固有角频率,以标准形式重写式(8),可得:

$$\hat{\omega} = \frac{\omega_n^2/G_p}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (9)$$

式中, $\omega_n^2 = G_p/J$, $2\zeta\omega_n = (D_p + K_1)/J$ 。

对式(9)进行拉普拉斯反变换,则时域中的频率响应为

$$\hat{\omega} = \frac{1}{G_p} \frac{\omega_n^2}{\sqrt{1-\zeta^2}} e^{-\zeta\omega_n t} \sin(\sqrt{1-\zeta^2} \omega_n t) \quad (10)$$

因此,系统的频率变化率为

$$\hat{\omega}_{\text{RoCoF}} = \frac{d\hat{\omega}}{dt} = \frac{1}{G_p} \cdot \frac{\omega_n^2}{\sqrt{1-\zeta^2}} e^{-\zeta\omega_n t} \cdot \sin\left[\arcsin(\sqrt{1-\zeta^2}) - \sqrt{1-\zeta^2} \omega_n t\right] \quad (11)$$

当 $t=0$ 时,瞬态过程中达到最大频率变化率:

$$\hat{\omega}_{\text{RoCoF}}|_{\text{max}} = \frac{\omega_n^2}{G_p} \frac{1}{J} \quad (12)$$

由此可以看出,最大频率变化率仅与虚拟惯性 J 有

关,而与阻尼系数 D_p 和 K_1 无关。当频率导数等于零时,可获得最大频率变化,即

$$\hat{\omega}|_{\text{max}} = \omega_n \exp\left(-\frac{\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}}\right) \cdot \arcsin(\sqrt{1-\zeta^2}) \approx \sqrt{\frac{G_p}{J}} e^{-\zeta} \quad (13)$$

根据式(13),最大频率变化与虚拟惯性和阻尼比成反比,这意味着最大频率变化将随着虚拟惯性和阻尼比的增加而减小。然而,增加虚拟惯性是不期望的,因为在减小最大频率变化的同时也会减小阻尼比,削弱了系统的功角稳定性。因此,引入附加阻尼完全避免了频率稳定性和功角稳定性之间的冲突。增加 K_1 的同时也可以增加虚拟惯性,同时调整 K_1 和虚拟惯性可以同时保证系统的功角稳定性和频率稳定性。

2.2 功角稳定性的定量分析

从图4可以导出引入附加阻尼后有功功率的控制规律,即

$$\omega = \frac{P_{\text{ref}} - P + D_p \omega_{\text{ref}} + K_1 \omega_g}{Js + D_p + K_1} \quad (14)$$

当系统稳定时,存在 $\omega_g = \omega$,将其代入式(14),得到与式(1)相同的结果,表明引入附加阻尼环节不会改变系统的稳态特性。

该系统是一个二阶非线性系统,其状态方程可以用标准形式表示。假设 x 是定义为 $x = [x_1, x_2]^T$ 的状态变量向量, $x_1 = \delta$, $x_2 = \omega$,可以得到:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_2 - \omega_g \\ \frac{P_{\text{ref}}}{J} - \frac{3V_g F(\delta)}{2JX_g} + \frac{D_p}{J}(\omega_{\text{ref}} - x_2) + \frac{K_1}{J}(\omega_g - x_2) \end{bmatrix} \quad (15)$$

通过置零式(15)中左侧的微分项,可以得到系统平衡点 $x_e = [\delta_e, \omega_e]^T$,这显然意味着 $\omega_e = \omega_g$, δ_e 必须满足:

$$\frac{3V_g F(\delta_e)}{2X_g} = P_{\text{ref}} + D_p(\omega_{\text{ref}} - \omega_g) \quad (16)$$

可以发现平衡点不依赖于 K_1 ,这再次表明附加阻尼方法不会影响系统的稳态特性。

仿真模型系统参数如表1所示,用以研究VSG的功角稳定性。求解式(15)中的非线性微分方程

组,以故障前的稳态作为初始状态,这样,就可以得到式(15)中状态变量的解,据此可以绘制电网电压暂降后非线性系统的状态空间轨迹。根据式(7)的分析,附加路径增加了阻尼比, K_1 越大,阻尼比越大,这有利于功角稳定,同时还减少了电网故障期间的最大频率变化。

表 1 仿真模型系统参数

Table 1 Parameters of simulation model

系统参数	符号	实际值	标么值
参考有功(MW)	P_{ref}	2.75	1.0
参考无功(p.u.)	Q_{ref}	0.00	0.0
电网电压(V)	V_g	563	1.0
电压基准(V)	V_{ref}	563	1.0
参考角频率(rad/s)	ω_{ref}	314	1.0
电网角频率(rad/s)	ω_g	314	1.0
电网电感(μ H)	L_g	255	0.46
阻尼系数(P_{max}/ω_{ref})	D_p	8	8
虚拟惯性(P_{max}/ω_{ref})	J	20	20
无功下垂系数(V_{ref}/P_{max})	K_{q1}	0.1	0.1

基于式(15)中的非线性系统,进一步说明系统的瞬态响应特性,如图5所示,其中, $\Delta\omega = \omega - \omega_{ref}$,可以观察到,当电网电压从1 p.u.下降到0.6 p.u.时,由于阻尼较小, $K_1=0, 0.5$ p.u.时 δ 将超过 δ_{ce} ,系统均失去功角稳定性;将 K_1 增加到5 p.u.可以消除不稳定性,保持VSG与电网的同步。此外,在相同条件下,将 K_1 增加到50 p.u.,如式(7)所示,由于 K_1 增加导致阻尼比增加,一方面使得功角超调量 δ_{max} 减小,提高了系统的功角稳定裕度;另一方面又使得 $\Delta\omega_{max}$ 减小,增强了系统的频率稳定性,这与式(13)中的定性分析结果一致,说明线性化和非线性化模型可以从不同角度相互印证。综上所述,较大的 K_1 能够在提高功角稳定性的同时增强频率稳定性。

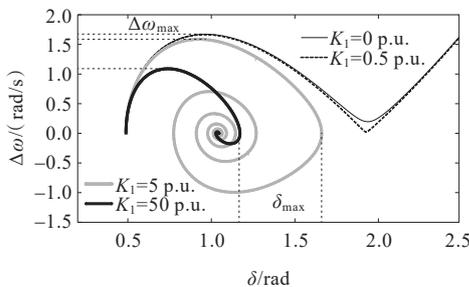


图 5 电压跌落下 K_1 对 VSG 瞬态性能的影响

Figure 5 Influence of K_1 on VSG transient performance under voltage sag

较大的 K_1 可以提高系统的功角、频率稳定性,但对于大多数实际应用来说,超大 K_1 也是不可取的,因为这会减慢有功功率回路的动态响应速度。只要最大功角超调量 δ_p 不超过 δ_{ce} ,就可以保证系统的功角稳定性,故需要对功角、频率稳定性和动态响应速度进行综合权衡,以此来确定 K_1 的取值。

对于每一个指定的虚拟惯性 J ,可以通过计算程序找到使系统稳定运行的临界值 K_1 ,如图6所示。 K_1 被初始化为一个较大值,如 $K_1=50$ p.u.,以确保系统在指定条件下稳定运行。然后将 K_1 以小步长逐渐减小,并在每次迭代计算期间找到最大功角超调量 δ_p ,直到 δ_p 超过 δ_{ce} 。计算步长设置为0.1 p.u.,由临界值的精度和计算负担的要求折中确定。重复该过程,就可以找到不同 J 下对应 K_1 的临界值,如图7所示,其中稳定和不确定运行区域分别在边界线的上方和下方。

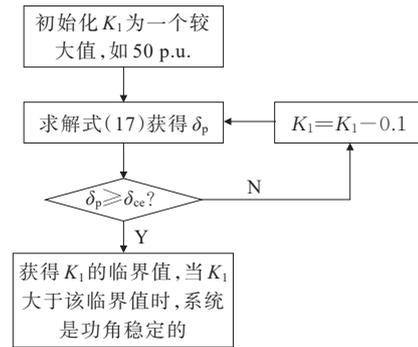


图 6 用于检测 K_1 临界值的迭代计算程序

Figure 6 Iterative calculation procedure for detecting the critical value of K_1

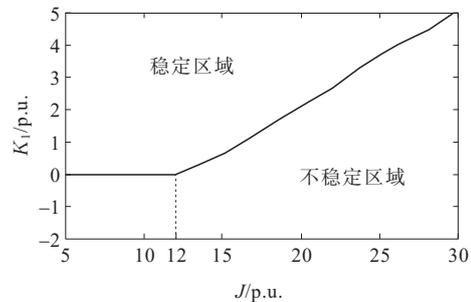


图 7 电网电压跌落时系统的稳定运行边界

Figure 7 Stable operating boundary of the system during voltage sag

由图7可以看出,随着虚拟惯性 J 的增加,为了保持系统稳定运行所需的 K_1 也在逐渐增加。例如,如果 $J < 12$ p.u.,即使不引入附加阻尼环节系统也可以保持功角稳定性;但当 $J \geq 12$ p.u.时,就必须引入附加阻

尼环节。定量分析和定性分析再次得出了同样的结论,即增加 K_1 可以实现VSG以更高的惯性运行。

3 仿真实验

为了验证改进附加阻尼方法的有效性以及线性化和非线性化模型相结合的理论分析方法的正确性,可以在Matlab/Simulink仿真平台上进行仿真实验。并网VSG的主要参数见表1。对于该仿真模型,设置电网电压 V_g 降低至0.6 p.u.且故障期间 P_{ref} 、 Q_{ref} 保持不变,测试系统的瞬态响应。为了进行比较验证,测试不同 K_1 参数对系统功角稳定性的影响,相应的仿真结果如图8所示。

如图8(a)所示,当 V_g 从1 p.u.降至0.6 p.u.时,系统会失去功角稳定性。尽管电压暂降后存在平衡点,但由于功角的超调导致系统无法达到平衡点,触发低频振荡故障,这意味着缺乏阻尼会导致系统失去稳定性。当 K_1 取值过小时,如图8(b)所示,系统同样会失去功角稳定性,无法与电网保持同步。当 $K_1=5$ p.u.时,如图8(c)所示,电网电压下降时附加阻尼环节可以稳定并网VSG系统。继续增加 K_1 ,即 $K_1=50$ p.u.,如图8(d)所示,系统的功角超调量和频率超调量均进一步减小,且 δ_{max} 、 $\Delta\omega_{max}$ 等参数与图5中的理论分析结果一致,证实了本文所提出的改进附加阻尼方法的有效性以及线性化和非线性化模型相结合的理论分析方法的正确性。

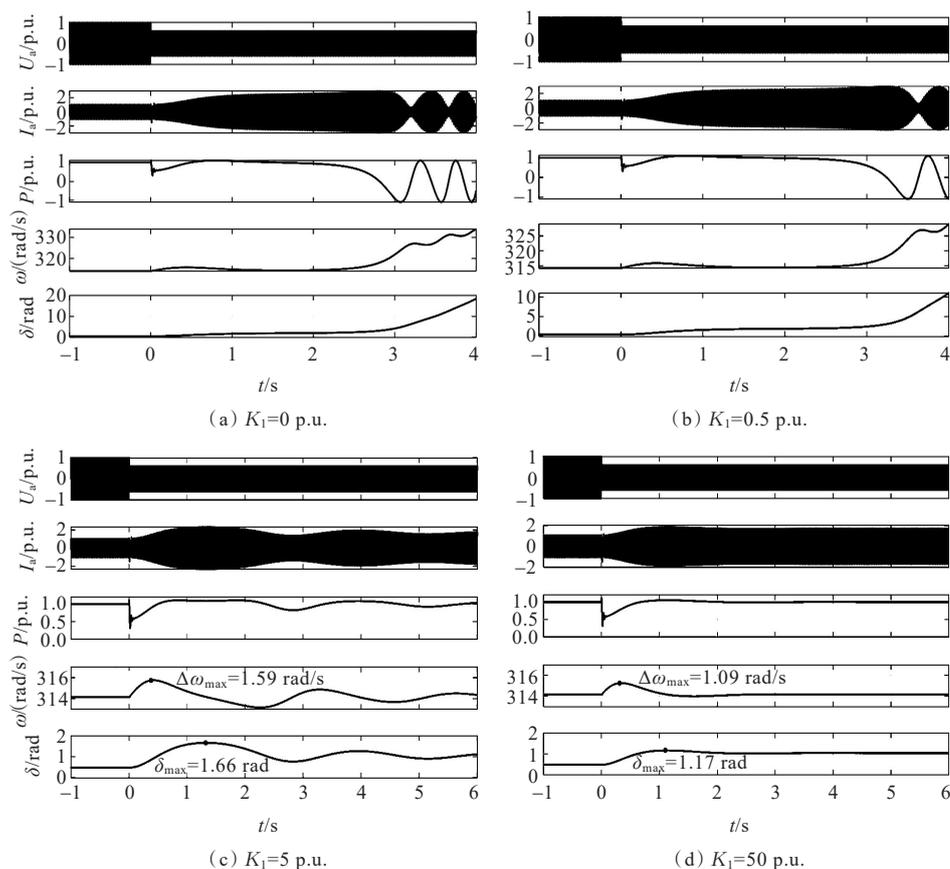


图8 V_g 从1 p.u.下降至0.6 p.u.时带附加阻尼环节的并网VSG系统的瞬态响应

Figure 8 Transient response of grid-connected VSG system with additional damping when V_g drops from 1 to 0.6 p.u.

4 结语

本文将线性化和非线性化模型相结合,分析了并网VSG在大扰动下的动态性能。线性化模型用

于定性分析,以提供直观的理解;非线性化模型用于定量分析,以评估电网故障后系统的功角稳定性。为了避免功角稳定性与频率稳定性之间的冲突,在有功功率控制回路中引入了附加阻尼环节。基于线性化模型,定性地解释了阻尼比、故障期间

的最大频率变化,表明附加阻尼环节可以提高系统的阻尼比,从而同时提高功角和频率稳定性;基于非线性化模型,评估了不同 K_1 取值下系统的功角稳定性。最后,仿真结果验证了附加阻尼方法以及线性化和非线性化模型相结合的理论分析方法的有效性。

参考文献:

- [1] 兰征,龙阳,曾进辉,等.考虑超调的虚拟同步发电机暂态功率振荡抑制策略[J].电力系统自动化,2022,46(11):131-141.
LAN Zheng, LONG Yang, ZENG Jinhui, et al. Transient power oscillation suppression strategy of virtual synchronous generator considering overshoot[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(11): 131-141.
- [2] 许水清,陶松兵,何怡刚,等.基于相电流瞬时频率估计的永磁直驱风电变流器开路故障诊断[J].电工技术学报,2022,37(2):433-444.
XU Shuiqing, TAO Songbing, HE Yigang, et al. Open-circuit fault diagnosis for back-to-back converter of PMSG wind generation system based on estimated instantaneous frequency of phase current[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(2): 433-444.
- [3] 李建林,丁子洋,刘海涛,等.构网型储能变流器及控制策略研究[J].发电技术,2022,43(5):679-686.
LI Jianlin, DING Ziyang, LIU Haitao, et al. Research on grid-forming energy storage converters and control strategies[J]. Power Generation Technology, 2022, 43(5): 679-686.
- [4] 谭丽平,谭鑫,王立娜,等.电网电压不平衡下考虑电流峰值限制的储能变流器协调控制策略[J].高压电器,2022,58(7):111-118.
TAN Liping, TAN Xin, WANG Lina, et al. Coordinated control strategy of power conversion system considering current peak limit under unbalanced grid voltage[J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(7): 111-118.
- [5] 邢鹏翔,贾璇悦,许长清,等.VSG低电压穿越的特性分析及控制方法研究[J].电网与清洁能源,2022,38(8):130-137+143.
XING Pengxiang, JIA Xuanyue, XU Changqing, et al. A study on characteristic analysis and control methods of low voltage ride through for the VSG[J]. Power System and Clean Energy, 2022, 38(8): 130-137+143.
- [6] FANG J, LI H, TANG Y, et al. Distributed power system virtual inertia implemented by grid-connected power converters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33(10): 8488-8499.
- [7] ZHONG Q C, WEISS G. Synchronverters: Inverters that mimic synchronous generator[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58(4): 1259-1267.
- [8] 钟庆昌.虚拟同步机与自主电力系统[J].中国电机工程学报,2017,37(2):336-349.
ZHONG Qingchang. Virtual synchronizer and autonomous power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(2): 336-349.
- [9] 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.
DING Ming, YANG Xiangzhen, SU Jianhui. Control strategies of inverters based on virtual synchronous generator in a microgrid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(8): 89-93.
- [10] 胡彬,吴超,年珩,等.薄弱电网下新能源设备并网锁相同步方式综述[J].电力自动化设备,2020,40(9):26-34.
HU Bin, WU Chao, NIAN Heng, et al. Overview of phase-locked synchronization methods of renewable energy equipment in weak and distorted grid[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(9): 26-34.
- [11] WU H, RUAN X B, YANG D S, et al. Small-signal modeling and parameters design for virtual synchronous generators [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63(7): 4292-4303.
- [12] FANG J, TANG Y, LI H, et al. A battery/ultracapacitor hybrid energy storage system for implementing the power management of virtual synchronous generators[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33(4): 2820-2824.
- [13] PAN D, WANG X, LIU F, et al. Transient stability of voltage-source converters with grid-forming control: a design-oriented study[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2020, 8(2): 1019-1033.
- [14] WU H, WANG X. A mode-adaptive power-angle control method for transient stability enhancement of virtual synchronous generators[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2020, 8(2): 1034-1049.

- analysis of hydrological model[J]. *Water Resources and Power*,2016,34(10):14-18.
- [16] ZHAO Y, WANG L, WU H, et al. Time-varying reliability method based on linearized Nataf transform[J]. *Quality and Reliability Engineering International*, 2021, 37(5): 1922-1938.
- [17] 韦东来,崔振山,陈军.混沌多项式新求解及其在板料成形性容差预测中的应用[J]. *机械工程学报*,2009,45(8): 261-265.
- WEI Donglai, CUI Zhenshan, CHEN Jun. New solution for polynomial chaos expansion and application in tolerance prediction for stamping process[J]. *Journal of Mechanical Engineering*,2009,45(8):261-265.
- [18] 蒋水华,李典庆,周创兵.随机响应面法最优概率配点数目分析[J]. *计算力学学报*,2012,29(3):345-351.
- JIANG Shuihua, LI Dianqing, ZHOU Chuangbing. Optimal probabilistic collocation points for stochastic response surface method[J]. *Chinese Journal of Computational Mechanics*,2012,29(3):345-351.
- [19] 戚日常,范慧芳,李飞,等.基于改进GSA-SVM模型的电力变压器故障诊断[J]. *智慧电力*,2022,50(6):50-56.
- XIAN Richang, FAN Huifang, LI Fei, et al. Power transformer fault diagnosis based on improved GSA-SVM model[J]. *Smart Power*,2022,50(6):50-56.
- [20] 徐肖伟,钱国超,邹德旭,等.不同模型下变压器绕组漏磁场及短路力的比对研究[J]. *高压电器*,2016,52(5): 85-89+95.
- XU Xiaowei, QIAN Guochao, ZOU Dexu, et al. Comparison research on leakage magnetic field and short-circuit force of transformer windings under different models[J]. *High Voltage Apparatus*,2016,52(5):85-89+95.
- [21] 俞双恩,王宁,于智恒,等.DRAINMOD-S模型参数的全局灵敏度分析[J]. *水科学进展*,2015,26(2):271-278.
- YU Shuangen, WANG Ning, YU Zhiheng, et al. Global sensitivity analysis of parameters in DRAINMOD-S[J]. *Advances in Water Science*,2015,26(2):271-278.
- [22] WEI S S, LI Y G, GAO X H, et al. Multi-stage sensitivity analysis of distributed energy systems: a variance-based sobol method[J]. *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*,2020,8(5):895-905.
- [23] 伍也凡,刘浩田,肖振锋,等.考虑源—网—荷不确定性的增量配电网规划研究综述[J]. *电力系统保护与控制*, 2021,49(8):177-187.
- WU Yefan, LIU Haotian, XIAO Zhenfeng, et al. Review of incremental distribution network planning considering the uncertainty of source-network-load[J]. *Power System Protection and Control*,2021,49(8):177-187.
- [24] 李瑞芳,杜浩,李坤泉,等.三维地形的空间电场计算方法研究[J]. *高压电器*,2021,57(4):47-54.
- LI Ruifang, DU Hao, LI Kunquan, et al. Study on space electric field calculation method of 3D terrain[J]. *High Voltage Apparatus*,2021,57(4):47-54.

(上接第81页 = Continued from page 81)

- [15] LI Y W, KAO C. An accurate power control strategy for power electronics-interfaced distributed generation units operating in a low voltage multi bus microgrid[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*,2009,24(12):2977-2988.
- [16] 汤蕾,沈沉.大规模风电接入对电力系统暂态稳定性影响机理研究[J]. *电力科学与技术学报*,2014,29(4):25-33.
- TANG Lei, SHEN Chen. The impact of large-scale wind generation on power system transient stability[J]. *Journal of Electric Power Science and Technology*, 2014, 29(4): 25-33.
- [17] 高峰,黄鸣宇,乔颖.考虑低电压穿越能力的风火联运系统暂态稳定分析[J]. *电力科学与技术学报*,2015,30(4):40-47.
- GAO Feng, HUANG Mingyu, QIAO Ying. Transient stability analysis of wind fire combined transport system considering low-voltage ride through capability[J]. *Journal of Electric Power Science and Technology*, 2015, 30(4): 40-47.