

与 SG 具有一致响应的 VSG 小信号建模和分析

陈 昕,张昌华,黄 琦,杨文龙,陈树恒,刘群英

(电子科技大学 能源科学与工程学院,四川 成都 611731)

摘要:提出一种新型的虚拟同步发电机(VSG)设计方法,构建虚拟的励磁控制器、调速器和电磁暂态模拟单元。分别对机端电压的 d 、 q 分量引入 PI 控制器,以达到 VSG 与同步发电机(SG)具有一致响应的目的。建立 VSG 单机无穷大系统小信号模型,求取并分析系统特征根及其参与因子。分析惯性时间常数、励磁参数对 VSG 小信号稳定性的影响规律,发现其与 SG 相关理论吻合。同时分析 PI 控制参数、线路参数对系统小信号稳定性的影响。利用 MATLAB/Simulink 仿真验证了上述方法的正确性。

关键词:虚拟同步发电机;一致性;小信号稳定性;逆变器;特征根;参与因子

中图分类号: TM 34;TM 712

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2017.11.013

0 引言

由于能源短缺、环境污染和电网供电可靠性的压力,分布式发电 DG(Distributed Generation)^[1]、微型电网^[2]、智能电网相继成为电力领域的研究热点。作为可将直流电能转换成交流电能的装置,逆变器凭借其控制灵活、适应面广、成本低廉和使用方便等优点^[1-23],得到了广泛应用。由此带来了逆变器拓扑结构设计^[3-4]、谐波防治^[5-6]、多逆变器并联运行^[7-8]、控制策略分析^[9-14]、包含多逆变器的配电网或微网稳定性分析^[22-25]等一系列问题。国内外学者对此做了大量的研究工作,本文重点关注逆变器的控制策略及其稳定性分析。

在 DG 和微网中,能量源(如光伏、风电、电动汽车等)输出功率具有随机性。而在馈线并网侧,由于用户消耗功率的随机波动,节点电压的幅值和相角比输网侧更为多变。因此,处于二者之间的逆变器,其控制策略和动态特性对微网运行有着重要的影响。由于同步发电机 SG(Synchronous Generator)在电力系统中已经有了一百多年的应用历史,其数学模型和控制策略已被广大的电力工作者熟知^[26],故模仿 SG 的特性成为逆变器控制策略研究的特点。从模仿 SG 的外特性出发,部分学者设计了具有下垂特性的控制器,并且讨论了控制器参数对功率准确分配和网络动态特性的影响^[9-10],更有学者提出了将逆变器控制成虚拟的 SG^[11-15]。文献[11]提出了虚拟同步

发电机 VSG(Virtual Synchronous Generator)的概念,即在逆变器控制器中模拟 SG 转子运动方程,并且通过模拟 SG 的一次调频和电压励磁调节来提高系统的频率稳定性和电压稳定性。类似地,文献[12]通过引入虚拟的励磁装置和调速器单元,基于 SG 三阶实用模型构造了控制器,在控制器的作用下,VSG 还具有 PQ、V/f 等不同的运行模式,拓展了文献[11]的工作。文献[13]提出了一种电流型 VSG 的控制策略,通过仿真和实验研究了虚拟转动惯量、转子阻尼对逆变器动态特性的影响,结果表明具有 SG 特性的逆变器有助于增强系统惯性。Zhong 和 Weiss 提出了将逆变器等效为 SG 使得逆变器具有 SG 的特性,起初将这种逆变器称为静止同步发电机^[14],随后更名为同步逆变器 SV(Synchronverter)^[15],并提出了同步逆变器的设计方法,摆脱了文献[12]中要求逆变器所模拟的 SG 的参数需源自相近容量 SG 参数的限制。这使得充分发挥电力电子单元控制的灵活性,构造出动态特性更加符合微网需要、同时具有 SG 特性的逆变器(如容量小但转动惯量非常大等)成为可能。近年来,VSG 技术发展迅速,其已不再需要锁相环就能实现同步^[16],应用到整流器上可使得整流器与同步电动机等效^[17],并且可应用到风力发电^[18]和柔性交流输电^[19]等方面,VSG 技术已经成为了下一代智能电网研究中的热点^[20-21]。但目前关于 VSG 的研究和设计还停留在对 SG 某些特性的模仿上,进一步地,应当将对 SG 特性的模仿提升到一致性的层面上。

在逆变器控制器的设计中,稳定性是一个非常重要的考量,小信号模型和根轨迹分析是常用的稳定性分析方法。基于此,文献[22-23]建立了逆变器内部各环节详细的数学模型,为其控制参数的设计提供理论依据,并通过特征根判断系统的稳定性。但对于包含多个逆变器的微网而言,由于“维数灾”的存

收稿日期:2016-08-08;修回日期:2017-06-11

基金项目:留学回国人员科研启动基金资助项目;中央高校基本科研业务费资助项目(ZYGX2015J104);国家自然科学基金资助项目(51677020)

Project supported by the Scientific Research Foundation for the Returned Overseas Chinese Scholars,the Fundamental Research Funds for the Central Universities(ZYGX2015J104) and the National Natural Science Foundation of China(51677020)

在和难以准确获取其他厂家逆变器控制器的参数,以及逆变器模型和控制策略的多样性,限制了上述方法的推广。需要注意的是,同样是进行小信号稳定性分析,文献[24]用逆变器所模仿的 SG 外特性来建立具有下垂特性的线性化模型,在此基础上研究包含多逆变器的微网小信号稳定性问题;文献[25]在研究分布式发电对配电网静态电压稳定影响的问题时,将以逆变器为接口的燃料电池发电站处理为 PV 节点。文献[24-25]均借鉴了输电网中 SG 模型的处理方法。由此可知,如果能够将逆变器控制成真正的 SG,则有助于将现有的大电网中历经百年发展的稳定性分析理论过渡到微网稳定性分析领域。而同步逆变器和 VSG 概念的出现,架起了这 2 个领域联系的桥梁。

本文首先回顾了稳定性分析中的 SG 数学模型,并在此基础上通过在 SG 特性模仿环节引入 PI 控制内环来设计 VSG 的控制器;建立了 VSG 单机无穷大系统小信号模型;根据所建模型求取和分析了系统特征根分布及其参与因子,并进一步分析了参数变化对 VSG 小信号稳定性的影响,结果显示本文所设计的 VSG 与 SG 具有相似的小信号特性,同时仿真验证了 VSG 与 SG 的一致性以及小信号建模与分析的正确性。

1 VSG 控制策略

1.1 稳定性分析中的 SG 数学模型

SG 三阶模型标幺化形式如下^[26]:

$$2H \frac{d\omega}{dt} = T_m - T_e = T_m - [E_d i_d + E_q i_q - (X_{d1} - X_{q1}) i_d i_q] \quad (1)$$

$$T_{d0} p E_q = E_f - E_q - (X_d - X_{d1}) i_d \quad (2)$$

$$T_{q0} p E_d = -E_d + (X_q - X_{q1}) i_q \quad (3)$$

另外,依照 SG 相关理论可补充电角度与机端电压方程如下:

$$\frac{d\theta}{dt} = \omega \quad (4)$$

$$u_d = E_d + X_{q1} i_q - R_s i_d \quad (5)$$

$$u_q = E_q - X_{d1} i_d - R_s i_q \quad (6)$$

其中, p 为微分算子; T_m 和 T_e 分别为机械转矩和电磁转矩; ω 为转子电角速度; θ 为电角度; H 为惯性时间常数; E_f 为励磁机励磁电压; E_d 、 E_q 分别为 d 、 q 轴暂态电动势; i_d 、 i_q 分别为 d 、 q 轴电流; X_d 、 X_q 分别为 SG d 、 q 轴同步电抗; X_{d1} 、 X_{q1} 分别为 d 、 q 轴暂态电抗; T_{d0} 、 T_{q0} 分别为 d 、 q 轴开路暂态时间常数; u_d 、 u_q 分别为机端电压的 d 、 q 轴分量; R_s 为定子绕组电阻。

实际运行中,SG 还有励磁装置与原动机及调速器。忽略饱和效应与限幅环节,励磁装置的数学模型如下:

$$T_i p u_{Lf} = -u_{Lf} + \sqrt{u_d^2 + u_q^2} \quad (7)$$

$$T_a p E_f = (-1 - K_a K_f / T_f) E_f - K_a (u_{Lf} + u_{Df} - U_{ref}) \quad (8)$$

$$T_i p u_{Df} = -u_{Df} - K_f E_f / T_f \quad (9)$$

其中, T_f 为低通滤波器时间常数; u_{Lf} 为低通滤波器输出电压; T_a 为电压调节器的时间常数, K_a 为其增益; U_{ref} 为给定电压; T_f 为阻尼反馈环节的时间常数, K_f 为其增益, u_{Df} 为其输出。

SG 的原动机与调速器可用一个简洁的模型表示,具体如下:

$$T_m = \frac{P_{set} + D_p f_n (1 - \omega)}{\omega} \quad (10)$$

其中, P_{set} 为设定的发电机输出功率; D_p 为下垂特性系数; f_n 为系统额定频率。

1.2 VSG 控制策略

逆变器通常可以分为能量传输和控制器 2 个部分^[15]。前者主要用于能量的转换和传输,包括三相逆变器桥路、滤波、线路、开关等环节;后者包括电压电流信号量测单元、控制器和驱动电路等,主要用于控制注入电网的功率、电流和电压等。本文所提的 VSG 的控制目标是要求从网侧看过去, VSG 具有和 SG 一致的特性。图 1 给出了 VSG 单机无穷大系统的主电路及控制器结构。图中, L_f 、 r_f 分别为滤波器电感、电阻; C_f 为滤波器电容; L_g 、 r_g 分别为传输线等效电感、电阻; u_b 为母线电压; i_l 为电感电流; u_o 为输出电压; i_o 为输出电流; u_i^* 为调制波。

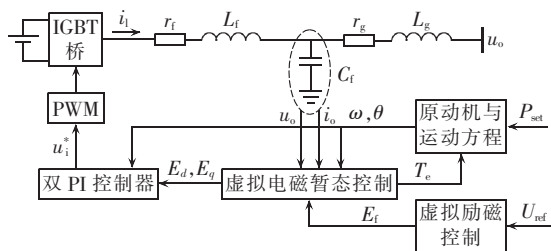


图 1 VSG 主电路与控制器

Fig.1 Main circuitry and controller of VSG

由式(5)和(6)可计算得到 VSG 所模拟的 SG 机端电压 u_{dq} , 因此 VSG 输出电压应等于 u_{dq} , 但由于逆变器桥路部分的阻抗与待模拟的 SG 阻抗未必一致, 若直接将 u_{dq} 作为逆变桥路调制信号, 逆变器实际机端电压 u_{odq} 未必等于 u_{dq} 。在 d 、 q 轴引入一个 PI 控制内环, 产生一组补偿分量 E_{cdq} , 其与 E_{dq} 相加后作为 PWM 的调制信号输入。控制器结构如图 2 所示。图

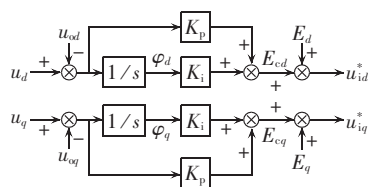


图 2 PI 控制器结构

Fig.2 Structure of PI controller

中, K_p, K_i 分别为 PI 控制器比例、积分增益; φ_{dq} 为积分器输出; u_{idq}^* 为 PI 控制器输出, 即为调制波 dq 轴分量。

2 VSG 小信号模型

根据图 1, VSG 小信号模型可分为原动机与运动方程、无穷大母线、虚拟励磁控制、虚拟电磁暂态控制、双 PI 控制器、LC 滤波器及传输线这 6 个子模块。

2.1 原动机与运动方程小信号模型

由式(1)和(10)可得描述原动机与运动方程的微分方程组, 线性化后的小信号模型如下:

$$2Hp\Delta\omega = -\Delta\omega(P_{\text{set}} + f_n D_p)/(\Delta\omega + 1)^2 - \Delta T_e \quad (11)$$

本文建模对象为 VSG 单机无穷大系统, 还需引入关于角度的状态变量来描述 VSG 自身参考坐标系与母线参考坐标系的相角差。从建模的简洁性考虑, 只需 1 个状态变量足以描述 VSG 与无穷大母线坐标系的相角关系; 但从小信号模型适用的普遍性角度出发, 本文设一公共坐标系, 其参考角频率为 ω_{com} (标么值取 1), 定义 2 个状态变量为 VSG 与母线参考系分别对 ω_{com} 的相角差。如需增加其他电源, 只需描述其与 ω_{com} 的关系, 这样便于扩展研究多 VSG 组成的微电网的小信号稳定性。

VSG 与公共坐标系相角差 δ_1 可由下式表示:

$$\frac{d\delta_1}{dt} = \omega_n(\Delta\omega + 1) - \omega_n\omega_{\text{com}} \quad (12)$$

其中, ω_n 为系统额定角频率。为方便角度的计算, 上式建立在有名值的形式下, 线性化后其小信号模型表达式为:

$$p\Delta\delta_1 = \omega_n\Delta\omega - \omega_n\Delta\omega_{\text{com}} \quad (13)$$

根据式(11)和(13), 可得原动机与运动方程小信号模型状态空间表达式如下:

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} \Delta\dot{\omega} \\ \Delta\dot{\delta}_1 \end{bmatrix} = \mathbf{A}_m \begin{bmatrix} \Delta\omega \\ \Delta\delta_1 \end{bmatrix} + \mathbf{B}_m \begin{bmatrix} \Delta E_{dq} \\ \Delta T_e \end{bmatrix} + \mathbf{B}_{\text{com}} \begin{bmatrix} \Delta\omega_{\text{com}} \end{bmatrix} \\ \Delta\omega = \mathbf{C}_\omega \begin{bmatrix} \Delta\omega \\ \Delta\delta_1 \end{bmatrix} \end{cases} \quad (14)$$

$$\mathbf{A}_m = \begin{bmatrix} -(P_{\text{set}} + f_n D_p)/[2H(\Delta\omega + 1)^2] & 0 \\ \omega_n & 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B}_m = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -1/(2H) \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B}_{\text{com}} = \begin{bmatrix} 0 \\ -\omega_n \end{bmatrix}, \quad \mathbf{C}_\omega = [1 \ 0]$$

其中, ΔE_{dq} 表示列向量 $[\Delta E_d \ \Delta E_q]^T$, 下文公式中凡下标带 dq 的变量均表示类似的列向量。

2.2 无穷大母线模型

将 VSG 自身参考坐标系设为公共坐标系, 则无穷大母线与公共坐标系角度差可表示为 δ_2 :

$$\frac{d\delta_2}{dt} = \omega_n - \omega_n(\Delta\omega + 1) \quad (15)$$

线性化后小信号模型为:

$$[\Delta\dot{\delta}_2] = \mathbf{B}_{\text{bus}}[\Delta\omega] \quad (16)$$

$$\mathbf{B}_{\text{bus}} = [-\omega_n]$$

2.3 虚拟励磁控制小信号模型

式(7)~(9)给出了 SG 励磁装置的数学模型, 将式(7)中 SG 机端电压 u_{dq} 对应于 VSG 输出电压 u_{odq} , 即可得到虚拟励磁控制环节的数学模型。线性化后其小信号模型如下:

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} \Delta\dot{u}_{Lf} \\ \Delta E_f \\ \Delta u_{Df} \end{bmatrix} = \mathbf{A}_{\text{exc}} \begin{bmatrix} \Delta u_{Lf} \\ \Delta E_f \\ \Delta u_{Df} \end{bmatrix} + \mathbf{B}_{\text{exc}} \begin{bmatrix} \Delta i_{ldq} \\ \Delta u_{odq} \\ \Delta i_{odq} \end{bmatrix} \\ \Delta E_f = \mathbf{C}_{\text{exc}} \begin{bmatrix} \Delta u_{Lf} \\ \Delta E_f \\ \Delta u_{Df} \end{bmatrix} \end{cases} \quad (17)$$

$$\mathbf{A}_{\text{exc}} = \begin{bmatrix} -1/T_r & 0 & 0 \\ -K_a/T_a & -1/T_a - K_a K_f/(T_a T_f) & -K_a/T_a \\ 0 & -K_f/T_f^2 & -1/T_f \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{B}_{\text{exc}} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \frac{2u_{od}}{T_r \sqrt{u_{od}^2 + u_{oq}^2}} & \frac{2u_{oq}}{T_r \sqrt{u_{od}^2 + u_{oq}^2}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{C}_{\text{exc}} = [0 \ 1 \ 0]$$

2.4 虚拟电磁暂态控制小信号模型

根据式(2)和(3)给出的 SG 电磁暂态模型, 将 i_{dq} 对应于 SG 输出电流 i_{odq} , 可得到虚拟电磁暂态控制数学模型。线性化后其小信号模型如下:

$$\begin{cases} [\Delta\dot{E}_{dq}] = \mathbf{A}_{\text{ele}}[\Delta E_{dq}] + \mathbf{B}_{\text{ele1}}[\Delta E_f] + \mathbf{B}_{\text{ele2}}[\Delta i_{ldq} \ \Delta u_{odq} \ \Delta i_{odq}]^T \\ \begin{bmatrix} \Delta E_{dq} \\ \Delta T_e \end{bmatrix} = \mathbf{C}_{\text{ele}}[\Delta E_{dq}] + \mathbf{D}_{\text{ele}} \begin{bmatrix} \Delta i_{ldq} \\ \Delta u_{odq} \\ \Delta i_{odq} \end{bmatrix} \end{cases} \quad (18)$$

$$\mathbf{A}_{\text{ele}} = \begin{bmatrix} -1/T_{q0} & 0 \\ 0 & -1/T_{d0} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B}_{\text{ele1}} = \begin{bmatrix} 0 \\ 1/T_{d0} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{B}_{\text{ele2}} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & (X_q - X_{q1})/T_{q0} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -(X_d - X_{d1})/T_{d0} & 0 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{C}_{\text{ele}} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & I_d \\ 0 & 1 & I_q \end{bmatrix}^T$$

$$\mathbf{D}_{\text{ele}} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & E_d - I_q(X_{d1} - X_{q1}) & E_q - I_d(X_{d1} - X_{q1}) \end{bmatrix}$$

2.5 双 PI 控制器小信号模型

根据图 2 可得双 PI 控制器数学模型, 线性化后其小信号模型如下:

$$\begin{cases} [\Delta\dot{\varphi}_{dq}] = \mathbf{B}_{\text{PI1}}[\Delta E_{dq}] + \mathbf{B}_{\text{PI2}} \begin{bmatrix} \Delta i_{ldq} \\ \Delta u_{odq} \\ \Delta i_{odq} \end{bmatrix} \\ [\Delta u_{idq}^*] = \mathbf{C}_{\text{PI}}[\Delta\varphi_{dq}] + \mathbf{D}_{\text{PI1}}[\Delta E_{dq}] + \mathbf{D}_{\text{PI2}}[\Delta i_{ldq} \ \Delta u_{odq} \ \Delta i_{odq}]^T \end{cases} \quad (19)$$

$$B_{PI1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, B_{PI2} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -1 & 0 & -R_s & X_{q1} \\ 0 & 0 & 0 & -1 & -X_{d1} & -R_s \end{bmatrix}$$

$$C_{PI} = \begin{bmatrix} K_i & 0 \\ 0 & K_i \end{bmatrix}, D_{PI1} = \begin{bmatrix} 1+K_p & 0 \\ 0 & 1+K_p \end{bmatrix}$$

$$D_{PI2} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -K_p & 0 & -K_p R_s & K_p X_{q1} \\ 0 & 0 & 0 & -K_p & -K_p X_{d1} & -K_p R_s \end{bmatrix}$$

2.6 LC 滤波器及传输线小信号模型

LC 滤波器及传输线模型可用六阶标么化形式下的微分方程描述,具体如下:

$$\begin{cases} L_f p i_{ld} / \omega_n = -r_f i_{ld} + L_f \omega i_{lq} + u_{ld} - u_{od} \\ L_f p i_{lq} / \omega_n = -r_f i_{lq} - \omega i_{ld} + u_{lq} - u_{oq} \\ C_f p u_{od} / \omega_n = C_f \omega u_{oq} + i_{ld} - i_{od} \\ C_f p u_{oq} / \omega_n = -C_f \omega u_{od} + i_{lq} - i_{oq} \\ L_g p i_{od} / \omega_n = -r_g i_{od} + L_g \omega i_{oq} + u_{od} - u_{bd} \\ L_g p i_{oq} / \omega_n = -r_g i_{oq} - L_g \omega i_{od} + u_{oq} - u_{bq} \end{cases} \quad (20)$$

式(20)中母线的 dq 轴电压 u_{ldq} 应以公共坐标系(即 VSG 参考系)为参考,其表达式如下:

$$u_{ld} = u_b \cos \delta_2, u_{lq} = u_b \sin \delta_2 \quad (21)$$

则式(20)线性化后小信号模型如下:

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{i}_{ldq} \\ \Delta u_{odq} \\ \Delta \dot{i}_{odq} \end{bmatrix} = A_{LC} \begin{bmatrix} \Delta i_{ldq} \\ \Delta u_{odq} \\ \Delta i_{odq} \end{bmatrix} + B_{LC1} [\Delta u_{ldq}^*] + B_{LC2} [\Delta \delta_2] + B_{LC3} [\Delta \omega] \quad (22)$$

$A_{LC} = \omega_n \times$

$$\begin{bmatrix} -r_f/L_f & \Delta\omega+1 & -1/L_f & 0 & 0 & 0 \\ -\Delta\omega-1 & -r_f/L_f & 0 & -1/L_f & 0 & 0 \\ 1/C_f & 0 & 0 & \Delta\omega+1 & -1/C_f & 0 \\ 0 & 1/C_f & -\Delta\omega-1 & 0 & 0 & -1/C_f \\ 0 & 0 & 1/L_g & 0 & -r_g/L_g & \Delta\omega+1 \\ 0 & 0 & 0 & 1/L_g & -\Delta\omega-1 & -r_g/L_g \end{bmatrix}$$

$$B_{LC1} = \omega_n \begin{bmatrix} 1/L_f & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1/L_f & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}^T$$

$$B_{LC2} = \omega_n [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ u_b \sin \delta_2 / L_g \ -u_b \cos \delta_2 / L_g]^T$$

$$B_{LC3} = \omega_n [I_{lq} \ -I_{ld} \ u_{oq} \ -u_{od} \ I_{oq} \ -I_{od}]^T$$

2.7 VSG 单机无穷大系统小信号模型

联立式(14)、(16)~(19)、(22)可得 VSG 单机无穷大系统小信号模型为:

$$\Delta \dot{\mathbf{x}}_{VSG} = A_{VSG} \Delta \mathbf{x}_{VSG} \quad (23)$$

$A_{VSG} =$

$$\begin{bmatrix} E & 0 & B_m C_{ele} & 0 & B_m D_{ele} & 0 \\ 0 & A_{exc} & 0 & 0 & B_{exc} & 0 \\ 0 & B_{ele1} C_{exc} & A_{ele} & 0 & B_{ele2} & 0 \\ 0 & 0 & B_{PI1} & 0 & B_{PI2} & 0 \\ B_{LC3} C_\omega & 0 & B_{LC1} D_{PI1} & B_{LC1} C_{PI} & F & B_{LC2} \\ B_{bus} C_\omega & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$E = A_m + B_{com} C_\omega, F = A_{LC} + B_{LC1} D_{PI2}$$

状态变量 $\mathbf{x}_{VSG}$ 为如下向量:

$$\Delta \mathbf{x}_{VSG} = [\Delta \omega \ \Delta \delta_1 \ \Delta u_{Lf} \ \Delta E_f \ \Delta u_{Df} \ \Delta E_{dq} \ \Delta \varphi_{dq} \ \Delta i_{ldq} \ \Delta u_{odq} \ \Delta i_{odq} \ \Delta \delta_2]^T \quad (24)$$

3 小信号稳定性分析及仿真验证

3.1 VSG 与 SG 一致性的验证

在 MATLAB/Simulink 仿真环境中,以图 1 所示系统为例,比较同参数的 VSG 和 SG 在启动、机端电压突降和机端三相短路 3 种工况下的动态响应。VSG 与 SG 各变量基准值如下: $T_{base} = 1/314.15 \text{ s}$, $\omega_{base} = 314.15 \text{ rad/s}$, $U_{base} = 310.26 \text{ V}$, $S_{base} = 50000 \text{ V} \cdot \text{A}$ 。系统参数见表 1。

表 1 系统参数

Table 1 Parameters of system

参数名	参数值	参数名	参数值
$H(\text{VSG\&SG})$	0.02 p.u.	$P_{set}(\text{VSG\&SG})$	0.6 p.u.
$\omega_n(\text{VSG\&SG})$	314.15 rad/s	$f_n(\text{VSG\&SG})$	50 Hz
$D_p(\text{VSG\&SG})$	0.4	$T_i(\text{VSG\&SG})$	0.02 s
$K_a(\text{VSG\&SG})$	300	$T_a(\text{VSG\&SG})$	0.001 s
$K_f(\text{VSG\&SG})$	0.001	$T_f(\text{VSG\&SG})$	0.1 s
$T_{d0}(\text{VSG\&SG})$	7.2575 s	$T_{q0}(\text{VSG\&SG})$	$1.4 \times 10^{-5} \text{ s}$
$X_d(\text{VSG\&SG})$	2.1017 p.u.	$X_{d1}(\text{VSG\&SG})$	0.9931 p.u.
$X_q(\text{VSG\&SG})$	2.1017 p.u.	$X_{q1}(\text{VSG\&SG})$	0.9931 p.u.
$R_s(\text{VSG\&SG})$	0.0025 p.u.	$K_p(\text{VSG})$	1.675
$K_i(\text{VSG})$	10	$u_b(\text{VSG\&SG})$	0.8 p.u.
$U_{ref}(\text{VSG\&SG})$	1.2 p.u.	$L_f(\text{VSG})$	0.8702 p.u.
$r_f(\text{VSG})$	0.0346 p.u.	$C_f(\text{VSG\&SG})$	0.0454 p.u.
$L_g(\text{VSG\&SG})$	0.0667 p.u.	$r_g(\text{VSG\&SG})$	1.7746 p.u.

仿真初始时刻 $P_{set} = 0$, 0.8 s 时施加 $P_{set} = 0.6 \text{ p.u.}$ 信号; 1.94 s 时配电网馈线节点母线电压突降 50%, 持续 200 ms 后恢复; 3.16 s 时, 并网点附近发生三相电压短路故障, 持续 200 ms 后故障消失。整个过程中 VSG 和 SG 的动态响应曲线如图 3 所示。可见, 在 2 种故障发生和消失的瞬间二者动态响应不一致, 其主要原因是因为 Simulink 中 SG 模型包括阻尼绕组(仿真中设置的阻尼绕组电感为 0.1 p.u.、电阻为

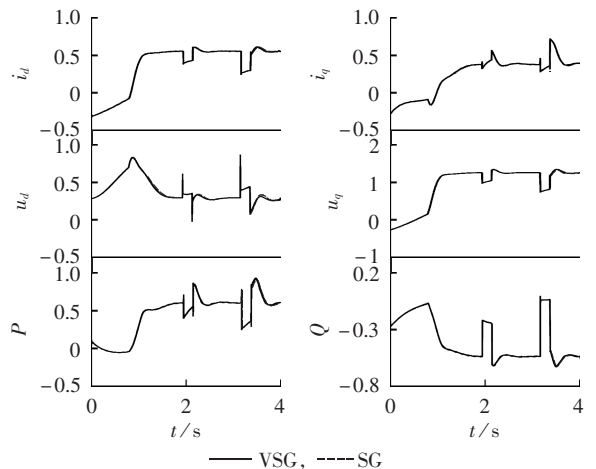


图 3 VSG 与 SG 的动态响应

Fig.3 Dynamic response of VSG and SG

600 p.u.,远大于绕组其他阻抗),而对应的 VSG 模型则无阻尼绕组。但这瞬间的差别对系统稳定性的影响可以忽略,也未对二者的动态响应造成明显差异。除故障发生和消失瞬间外,其余时刻 VSG 的电压(标幺值)、电流(标幺值)与功率(标幺值)均与 SG 保持一致,验证了所提 VSG 控制策略与 SG 的一致性。

3.2 VSG 小信号稳定性分析

根据 VSG 单机无穷大系统小信号模型,将稳态工作点各参数值代入系统状态矩阵 $\mathbf{A}_{\text{VSG}}$ 中,通过求解 $\mathbf{A}_{\text{VSG}}$ 的全部特征根,可以分析系统在该运行点处小信号的稳定性。通过参与因子分析^[26]可分析特征根对应的模态与状态变量的关联程度,以进一步分析可能引起系统不稳定的原因。稳态工作点各参数值见表 2,求得的系统特征根如表 3 所示。

表 2 稳态工作点
Table 2 Parameters at steady-state operating point

参数名	参数值	参数名	参数值
$\Delta\omega$	0	δ_2	-0.797 8 rad
E_d	0.595 p.u.	E_q	0.741 p.u.
I_{d}	0.322 p.u.	I_q	0.588 p.u.
U_{od}	0.402 p.u.	U_{oq}	1.127 p.u.
I_{od}	0.342 p.u.	I_{oq}	0.536 p.u.

表 3 系统特征根
Table 3 Eigenvalues of system

特征根	数值	特征根	数值
λ_1	0	λ_9	-475-j 2 229
λ_2	-3.79-j 0.0267	λ_{10}	-475+j 2 229
λ_3	-3.79+j 0.0267	λ_{11}	-4 007
λ_4	-0.925	λ_{12}	-2996-j 3 905
λ_5	-12.6	λ_{13}	-2996+j 3 905
λ_6	-19.3-j 32.6	λ_{14}	-4 198-j 7 341
λ_7	-19.3+j 32.6	λ_{15}	-4 198+j 7 341
λ_8	-1 793	λ_{16}	-69 553

由表 3 可知, $\lambda_1=0$,这是因为状态变量 δ_1 被定

义为 VSG 参考系对公共参考系(VSG 参考系)的相角差,因此 $\mathbf{A}_{\text{VSG}}$ 与 δ_1 所对应的整行元素全为 0,必然有一特征根为 0, λ_1 对系统稳定性无影响;另外, λ_{16} 实部绝对值远大于其他特征根实部绝对值,对系统稳定性影响很小。综上,下文分析中将不考虑 λ_1 与 λ_{16} 。

根据特征根对应的振荡频率,系统共轭特征根可分为高频与低频 2 类。其中 $\lambda_2, \lambda_3, \lambda_6, \lambda_7$ 为低频特征根, $\lambda_9, \lambda_{10}, \lambda_{12}—\lambda_{15}$ 为高频特征根。此外, $\lambda_4, \lambda_5, \lambda_8, \lambda_{11}$ 为实根。

通过计算可得各特征根参与因子见表 4。由表 4 可知, λ_2, λ_3 主要与 PI 控制器的积分器输出 φ_{dq} 相关; λ_4 与 δ_2 相关; $\lambda_5—\lambda_7$ 主要与虚拟励磁控制环节状态变量以及电磁暂态环节状态变量 E_q 相关,其中 λ_5 与虚拟励磁反馈环节状态变量 u_{Df} 关系更密切,而 λ_6, λ_7 与虚拟励磁环节低通滤波器状态变量 u_{Lf} 以及 E_q 关系更密切; $\lambda_8—\lambda_{10}, \lambda_{12}—\lambda_{15}$ 主要与 LC 滤波器和传输线状态变量 $i_{\text{ldq}}, u_{\text{odq}}, i_{\text{odq}}$ 相关,同时也与 ω 和 E_d 有一定关系; λ_{11} 与励磁电压 E_{f} 相关。

3.3 参数变化对 VSG 小信号稳定性的影响

利用小信号模型和根轨迹分析方法研究惯性时间常数 H 、虚拟反馈增益 K_{f} 和 PI 控制参数 K_{p} 与 K_{i} 以及线路参数与系统小信号稳定性的关系,用于指导 VSG 控制器参数的设计。

3.3.1 惯性时间常数 H 变化

惯性时间常数 H 从 0.001 p.u. 变化至 0.1 p.u.,系统特征根变化轨迹如图 4 所示。可见 $\lambda_2—\lambda_5$ 和 λ_{11} 基本不变; λ_6, λ_7 向右运动,系统对低频振荡模态阻尼比降低; λ_8 向右运动,其所对应的非振荡模态阻尼比降低; $\lambda_9, \lambda_{10}, \lambda_{12}, \lambda_{13}$ 向左移动远离虚轴, $\lambda_{14}, \lambda_{15}$ 向右运动,实部逐渐趋近于 -3×10^3 。综上,3 对高频特征根对系统稳定性没有影响,低频模态阻尼比随着 H 增加而减小,此结论与 SG 相关理论吻合^[26]。

表 4 参与因子表
Table 4 Participation factor

状态变量	λ_1	λ_2	λ_3	λ_4	λ_5	λ_6	λ_7	λ_8	λ_9	λ_{10}	λ_{11}	λ_{12}	λ_{13}	λ_{14}	λ_{15}	λ_{16}
ω	0	0	0	0	0.001	0	0	0.240	0.109	0.109	0	0.010	0.010	0.2800	0.2800	0.002
δ_1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
δ_2	0	0	0	1.001	0.003	0.001	0.001	0	0	0	0	0	0	0	0	0
u_{Lf}	0	0	0	0	0.112	0.441	0.441	0	0	0	0	0	0	0	0	0
E_{f}	0	0	0	0	0	0.001	0.001	0	0	0	0.998	0	0	0	0	0
u_{Df}	0	0	0	0	1.223	0.113	0.113	0	0	0	0.002	0	0	0	0	0
E_d	0	0	0	0	0	0	0	0.002	0.001	0.001	0	0.002	0.002	0.000 2	0.000 2	0.996
E_q	0	0	0	0	0.346	0.673	0.673	0.001	0	0	0	0	0	0	0	0
φ_d	0	0.5	0.5	0	0	0	0	0.002	0	0	0	0	0	0	0	0
φ_q	0	0.5	0.5	0	0.001	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
i_{ld}	0	0	0	0	0	0	0	0.783	0.261	0.261	0	0.169	0.169	0.0160	0.0160	0
i_{lq}	0	0	0	0	0	0	0	0.125	0.382	0.382	0	0.072	0.072	0.0160	0.0160	0
u_{od}	0	0	0	0	0	0	0	0.267	0.048	0.048	0	0.481	0.481	0.1040	0.1040	0
u_{oq}	0	0	0	0	0	0	0	0.394	0.152	0.152	0	0.412	0.412	0.1330	0.1330	0
i_{od}	0	0	0	0	0	0	0	0.339	0.029	0.029	0	0.136	0.136	0.1650	0.1650	0
i_{oq}	0	0	0	0	0	0	0	0.176	0.018	0.018	0	0.077	0.077	0.3160	0.3160	0.002

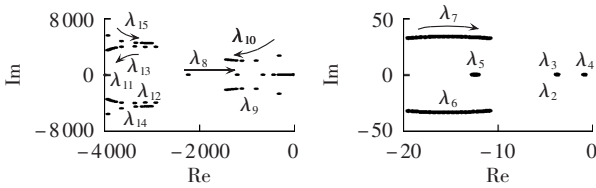


图 4 H 增加时系统特征根轨迹

Fig.4 Trajectory of eigenvalues when H increases

3.3.2 虚拟励磁反馈增益 K_f 变化

虚拟励磁反馈增益 K_f 从 0.001 变化至 2 时,系统特征根轨迹如图 5 所示。可见,随着 K_f 增加, λ_{11} 快速远离虚轴,其所对应的非振荡衰减模态阻尼迅速增大,结合参与因子表可知,与其相关的状态变量 E_f 受扰后可能因阻尼过大而响应迟缓; λ_6, λ_7 实部和虚部均减小,向虚轴靠近,系统低频阻尼减小,甚至可能出现振荡失稳;其他特征根基本不变。在 SG 小信号稳定性分析中也有同样的结论,即 SG 在重负荷工况下,采用高放大倍数快速励磁时($K_f \gg 1$),系统可能呈现负阻尼,一旦此负阻尼比 SG 阻尼绕组、励磁绕组和机械正阻尼还强,系统就可能会出现振荡失稳^[26]。在 VSG 中,减小 K_f 能够避免系统负阻尼振荡失稳的情况,但低频阻尼的增加又会影响虚拟励磁控制的快速性。对于此矛盾,可参考 SG 中引入电力系统稳定器的方法尝试解决,不再赘述。

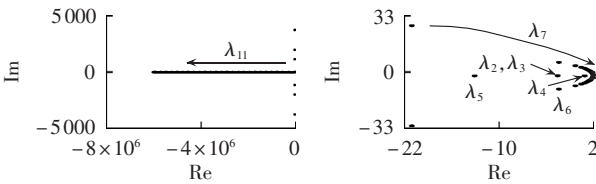


图 5 K_f 增加时系统特征根轨迹

Fig.5 Trajectory of eigenvalues when K_f increases

3.3.3 PI 控制参数 K_p, K_i 变化

K_p 从 0.1 变化至 10、 K_i 从 0 变化至 40,系统特征根轨迹分别如图 6 所示。由图 6(a)可知,影响系统稳定性的是特征根 λ_9, λ_{10} ,其实部随 K_p 增大首先远离虚轴,然后向虚轴靠近,最终进入右半平面,导致系统失稳。由图 6(b)可知,随着 K_i 增大,与 PI 控制器的积分器输出 φ_{dq} 相关的共轭特征根 λ_2, λ_3 实部逐渐远离虚轴,虚部经历增大到减小然后再增大再减小最后变为 0,使 λ_2, λ_3 变为实根的过程,另一个与 φ_q

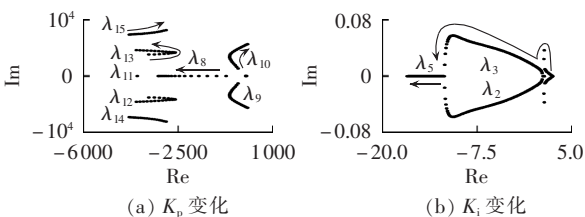


图 6 K_p, K_i 增加时系统特征根轨迹

Fig.6 Trajectory of eigenvalues when K_p and K_i increase

弱相关的实根 λ_5 也逐渐远离虚轴。其他特征根因随 PI 参数变化而基本不变,为了清晰,故在图 6 中没有绘制其根轨迹。综上,选取 PI 控制器参数时, K_p 的选取关系到系统的稳定性,过大的比例参数 K_p 将使系统失稳;而 K_i 取值在 0~40 内时对小信号稳定性影响不大,根据系统响应速度、稳态精度等要求对其进行设计即可。

3.3.4 输电线路参数变化

低压输电线路一般呈阻性,但其阻感比(R/X)因传输线选型不同而不同,甚至会近似呈感性。同时,受设备运行环境或地理因素制约,线路长度也会有变化。首先分析线路阻感比变化对系统稳定性的影响。线路阻感比由 26 变化至 0.5 时,系统特征根轨迹如图 7 所示。可见, $\lambda_{12} - \lambda_{15}$ 迅速向虚轴靠近,实根 λ_8 也向虚轴迅速移动, λ_9, λ_{10} 虚部减小,实部变化小, λ_6, λ_7 也向虚轴靠近。综上,线路阻感比减小会使系统高频域阻尼比迅速减小,同时减小低频域阻尼,导致系统振荡,甚至失稳。

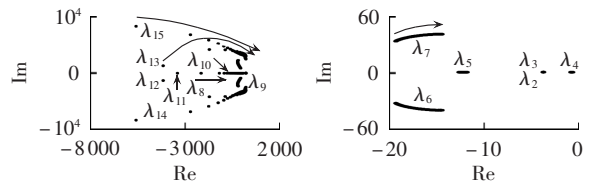


图 7 R/X 减小时系统特征根轨迹

Fig.7 Trajectory of eigenvalues when R/X decreases

分析阻性线路下,线路长度变化对系统稳定性的影响。线路长度由 2.5 km 减小至 0.5 km 时,系统特征根轨迹如图 8 所示。可见, $\lambda_9, \lambda_{10}, \lambda_8$ 向虚轴靠近; $\lambda_{12} - \lambda_{15}$ 离虚轴很远,对系统稳定性影响不大; λ_6, λ_7 向虚轴靠近。综上,线路长度减小,系统高、低频域阻尼比减小,易导致系统振荡。

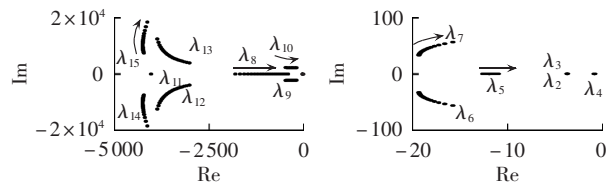


图 8 线路长度减小时系统特征根轨迹

Fig.8 Trajectory of eigenvalues when transmission line length decreases

3.3.5 分析结论与仿真验证

从上文得出结论可知, H, K_f 对 VSG 小信号稳定性的影响与 SG 中对应参数所起的作用一致。因此,在 VSG 的设计中,可以充分借助 SG 的研究成果,实现从“特性模仿”到“特性设计”的跨越,设计出更符合在微电网中运行的 VSG。同时,以小信号稳定性分析为参考对系统参数进行配置,可保证系统的稳定以及各频段具有足够的阻尼,这为 VSG 控制参数、线路参数的设计与优化提供了理论依据。

为验证上述小信号稳定性分析的正确性,可根据各参数变化时的特征根轨迹,选取参数的临界值或者导致系统振荡的值,在仿真中观察是否出现分析所预测的响应。限于篇幅,本文仅对 K_I 的取值进行验证。

$K_I=0.02$ 时,VSG 低频特征根 λ_6, λ_7 变化至 $-1 \pm j4.9$,对应低频振荡周期为 1.3 s,阻尼比约为 0.2,则振荡衰减至初始幅值的 37% 需要振荡的 0.8 个周期。阻尼最小的高频特征根 λ_9, λ_{10} 虚部对应的振荡周期为 0.0028 s。VSG 输出功率(标么值)受小扰动后的响应曲线如图 9(a)所示,图 9(b)为其局部放大图。可见,输出功率受扰后高、低频域振荡周期以及衰减速度与特征根分析结论吻合。

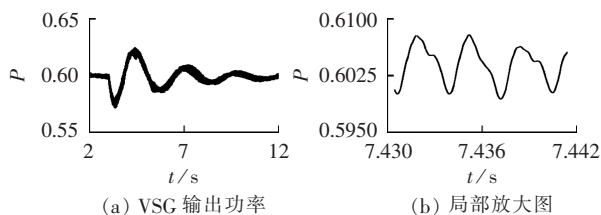


图 9 有功功率波形 ($K_I=0.02$)

Fig.9 Waveform of active power ($K_I=0.02$)

4 结论

本文设计了一种与 SG 具有一致响应特性的新型 VSG 控制器,并对其单机无穷大系统进行了小信号建模与分析,为 VSG 控制参数设计提供了理论依据。分析结果表明,所设计的 VSG 与 SG 也具有一致的小信号特性。因此,在微网稳定性分析和运行管理中,可以近似地用 SG 的模型等效逆变器的数学模型,这不仅可为微网稳定性分析提供便利,也有助于利用输电网成熟的理论指导微网的运行。更为重要的是,可以充分利用电力电子单元控制的灵活性,摆脱实际 SG 在材料、成本和制造工艺方面的限制,设计出动态特性更符合在微网中运行的 VSG。

参考文献:

- [1] ZHONG Qingchang, TOMAS H. Control of power inverters in renewable energy and smart grid integration[M]. Hoboken, USA: Wiley-IEEE Press, 2013: 44-59.
- [2] 李鹏, 窦鹏冲, 李雨薇, 等. 微电网技术在主动配电网中的应用[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(4): 8-16.
LI Peng, DOU Pengchong, LI Yuwei, et al. Application of micro-grid technology in active distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(4): 8-16.
- [3] 马琳, 孙凯, Remus Teodorescu, 等. 高效率中点钳位型光伏逆变器拓扑比较[J]. 电工技术学报, 2011, 26(2): 108-114.
MA Lin, SUN Kai, Remus Teodorescu, et al. Comparison of the topologies of high efficiency neutral point clamping photovoltaic inverters[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(2): 108-114.
- [4] 徐聪, 程启明, 李明, 等. Z 源逆变器及其多种改进拓扑结构的比

较[J]. 电网技术, 2014, 38(10): 2926-2931.

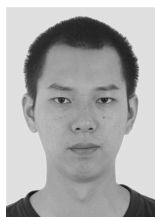
- XU Cong, CHENG Qiming, LI Ming, et al. A comparative simulation study on Z-source inverter and its various improvement topologies[J]. Power System Technology, 2014, 38(10): 2926-2931.
- [5] TOMAS H, ZHONG Qingchang. A current-control strategy for voltage-source inverters in microgrids based on H_∞ and repetitive control[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2011, 26(3): 943-952.
- [6] 李国庆, 王鹤, 张慧杰. 微电网中基于逆变电源控制的重要节点电能质量管理方法[J]. 电工技术学报, 2014, 29(2): 177-184.
LI Guoqing, WANG He, ZHANG Huijie. Power quality management method based on inverter source control for important node in microgrid[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(2): 177-184.
- [7] 张庆海, 彭楚武, 陈燕东, 等. 一种微网多逆变器并联运行控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(25): 126-132.
ZHANG Qinghai, PENG Chuwu, CHEN Yandong, et al. A control strategy for parallel operation of multi-inverters in microgrid[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(25): 126-132.
- [8] 王逸超, 罗安, 金国彬, 等. 大连线阻抗环境下的微网逆变器并联运行策略[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(4): 858-865.
WANG Yichao, LUO An, JIN Guobin, et al. Microgrid inverter parallel operation strategy in large feeder impedance environment[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(4): 858-865.
- [9] ZHONG Qingchang. Robust droop controller for accurate proportional load sharing among inverters operated in parallel[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60(4): 1281-1290.
- [10] 张尧, 马皓, 雷彪, 等. 基于下垂特性控制的无互联线逆变器并联动态性能分析[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(3): 42-48.
ZHAO Yao, MA Hao, LEI Biao, et al. Analysis of dynamic performance for parallel operation of inverters without wire interconnections[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(3): 42-48.
- [11] FANG Gao, IRAVANI M R. A control strategy for a distributed generation unit in grid-connected and autonomous modes of operation[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2008, 23(2): 850-859.
- [12] 丁明, 杨向真, 苏建徽. 基于虚拟同步发电机思想的微网逆变器控制策略[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.
- [13] YONG Chen, RALF H, DIRK T, et al. Improving the grid power quality using virtual synchronous machines[C]//Proceedings of the 2011 International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives. Torremolinos, Spain: [s.n.], 2011: 1-6.
- [14] ZHONG Qingchang, GEORGE W. Static synchronous generators for distributed generation and renewable energy[C]//Proceedings of the 2009 IEEE PES Power Systems Conference & Exhibition (PSC). Washington DC, USA: [s.n.], 2009: 1-6.
- [15] ZHONG Qingchan, GEORGE W. Synchronverters: inverters that mimic synchronous generators[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58(4): 1259-1267.
- [16] ZHONG Qingchan, NGUYEN P L, MA Z, et al. Self-synchronised synchronverters: inverters without a dedicated synchronisation unit[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(2): 617-630.

- [17] MA Z,ZHONG Qingchan,YAN J. Synchronverter-based control strategies for three-phase PWM rectifiers[C]//Proceedings of the 7th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications(ICIEA 2012). Singapore:IEEE,2012:225-230.
- [18] MA Z,ZHONG Qingchan. Synchronverter-based control strategy for back-to-back converters in wind power applications[C]//Proceedings of the 8th IFAC Symposium on Power Plants and Power Systems Control(PP&PSC). Toulouse,France:[s.n.],2012:349-354.
- [19] NGUYEN P L,ZHONG Qingchan,BLAABJERG F,et al. Synchronverter-based operation of STATCOM to mimic synchronous condensers[C]//Proceedings of the 7th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications(ICIEA 2012). Singapore:[s.n.],2012:942-947.
- [20] 郑连清,庄琛,马世强,等. 微电网改进负荷功率分配策略与并网稳定性分析[J]. 电力自动化设备,2015,35(4):17-23.
- ZHENG Lianqing,ZHUANG Chen,MA Shiqiang,et al. Improved load power allocation strategy for microgrid and grid-connection stability analysis[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015,35(4):17-23.
- [21] 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.
- LÜ Zhipeng,SHENG Wanxing,ZHONG Qingchang,et al. Virtual synchronous generator and its applications in micro-grid[J]. Proceedings of the CSEE,2014,34(16):2591-2603.
- [22] 张建华,苏玲,刘若溪,等. 逆变型分布式电源微网小信号稳定性动态建模分析[J]. 电力系统自动化,2010,34(22):97-102.
- ZHANG Jianhua,SU Ling,LIU Ruoxi,et al. Small-signal dynamic modeling and analysis of a microgrid composed of inverter-interfaced distributed generations[J]. Automation of Electric Power Systems,2010,34(22):97-102.
- [23] NAGARAJU P,MILAN P,TIMOTHY C G. Modeling,analysis and testing of autonomous operation of an inverter-based mi-

crogrid[J]. IEEE Transactions on Power Electronics,2007,22(2):613-625.

- [24] 肖朝霞,王成山,王守相. 含多微型电源的微网小信号稳定性分析[J]. 电力系统自动化,2009,33(6):81-85.
- XIAO Zhaoxia,WANG Chenshan,WANG Shouxiang. Small-signal stability analysis of microgrid containing multiple micro sources[J]. Automation of Electric Power Systems,2009,33(6):81-85.
- [25] 陈海炎,段献忠,陈金富. 分布式发电对配网静态电压稳定性的影响[J]. 电网技术,2006,30(19):27-30.
- CHEN Haiyan,DUAN Xianzhong,CHEN Jinfu. Impacts of distributed generation on steady state voltage stability of distribution system[J]. Power System Technology,2006,30(19):27-30.
- [26] 倪以信,陈寿孙,张宝霖. 动态电力系统的理论和分析[M]. 北京:清华大学出版社,2002:45-58.

作者简介:



陈 昕

陈 昕(1988—),男,重庆人,博士研究生,研究方向为智能电网、逆变器控制技术(E-mail:ainks517@163.com);

张昌华(1975—),男,湖北恩施人,副教授,博士,研究方向为智能电网、新能源技术、微电网分析;

黄 琦(1976—),男,贵州遵义人,教授,博士研究生导师,博士,研究方向为电力系统分析、智能电网;

杨文龙(1991—),男,湖北天门人,硕士研究生,研究方向为智能电网、新能源技术、微电网分析;

陈树恒(1974—),男,四川仁寿人,副教授,博士,研究方向为现代配电网分析、运行及规划,智能变电站技术和电力系统广域测量与控制;

刘群英(1977—),女,四川资阳人,副教授,博士,研究方向为电力系统分析。

Small signal modeling for virtual synchronous generator consistent with synchronous generator and analysis

CHEN Xin,ZHANG Changhua,HUANG Qi,YANG Wenlong,CHEN Shuheng,LIU Qunying

(School of Energy Science and Engineering,University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731,China)

Abstract: An improved VSG(Virtual Synchronous Generator) model is presented through modeling of virtual exciter,governor,and electromagnetic transient simulation unit. A PI internal-loop controller is designed for inverter terminal voltage d - and q -axis elements,which ensures that the proposed improved VSG can provide an equivalent dynamic response as SG(Synchronous Generator). A small-signal model of a single VSG machine infinite-bus system is developed,and then the system eigenvalues and participation factors are calculated. Effects of the inertia time constants and the excitation system parameters on VSG small-signal stability are analyzed. The analyzed conclusion coincides with the correlative theories of SG. Influences of the PI controller parameters and the line parameters on VSG small-signal stability are also analyzed. Simulative results based on MATLAB/Simulink verify the effectiveness of the proposed method.

Key words: virtual synchronous generator; consistency; small-signal stability; electric inverters; eigenvalue; participation factor