

DOI:10.12158/j.2096-3203.2021.06.007

电网电压前馈控制 VSG 的阻抗建模与并网稳定性分析

杨伊茜¹, 陈杰¹, 万雨朦¹, 章新颖¹, 王开春²

(1. 南京航空航天大学自动化学院, 江苏 南京 211106;

2. 北京精密机电控制设备研究所, 北京 100076)

摘要:针对电网电压谐波背景下虚拟同步发电机(VSG)并网电流畸变及并网稳定性下降问题,文中提出了一种基于电流环的电网电压前馈控制策略。从入网电流传递函数出发,设计电压前馈控制模块以消除背景谐波的影响,并基于谐波线性化方法分别建立加入前馈控制前后的VSG序阻抗模型,对其在各频段阻抗特性及并网稳定性上的影响进行对比分析。结果表明,引入该前馈控制等同于在VSG输出端并联虚拟阻抗,输出阻抗的高频段幅频曲线上移,可以改善非理想电网条件下的并网电流质量。同时,中高频段相频特性由容性矫正为感性,可以消除并网条件下的谐波振荡风险,提高交互系统稳定性。最后,基于实时仿真实验平台(RT-LAB)硬件在环实验验证了文中控制策略及理论分析的正确性。

关键词:虚拟同步发电机(VSG);背景谐波;电网电压前馈控制;谐波线性化;阻抗建模;并网稳定性

中图分类号:TM464

文献标志码:A

文章编号:2096-3203(2021)06-0052-10

0 引言

随着分布式电源在电力系统中渗透率的不断提高,传统电网将逐步发展成为电力电子变换装置占主导的低惯性、欠阻尼网络,电网调频调压难度增加,系统稳定性受到影响^[1-2]。为解决上述问题,国内外学者提出了虚拟同步发电机(virtual synchronous generator, VSG)技术^[3-6],通过对电力电子并网装置施以特定的控制,模拟同步发电机(synchronous generator, SG)的外特性。

目前,针对VSG的虚拟惯量控制^[4,6]、有功无功功率支撑^[7]、小信号建模^[8-10]、参数优化设计^[10-11]等已开展了卓有成效的研究,但鲜有研究涉及电网含背景谐波的非理想条件下VSG对系统鲁棒性的影响。

针对背景谐波条件下的控制策略,如多谐振补偿器^[12-15]、超前校正环节^[16]、电网电压前馈控制^[17-18]等已有诸多报道。文献[17]研究了LCL型逆变器的电网电压前馈方案,指出其可以有效降低电网电压引起的电流谐波;文献[18]从虚拟阻抗角度进行分析,指出前馈控制可以改变逆变器外阻抗特性,从而改善并网稳定性。但是上述文献仅针对常规电流控制型并网逆变器,并未涉及VSG技术。同时,为了推动VSG在分布式电网中的应用,国内外学者对VSG与电网之间的交互规律展开研究。文献[19-20]对比分析了电压控制型VSG与传统

电流源型逆变器、电流控制型VSG的阻抗特性,发现电压控制型VSG的输出阻抗在中低频段呈感性,与电网交互时具有更加稳定的特性;但在高频段呈容性,并网时存在谐波振荡的风险。

针对以上问题,文中提出了一种基于电流环的VSG电网电压前馈控制。首先,分析了VSG工作原理及前馈函数的设计原则,采用谐波线性化方法,推导有、无电网电压前馈控制的VSG输出阻抗模型。然后,研究VSG在不同频段下的阻抗特性与各控制环节的关系,发现电网电压前馈控制可以有效抑制VSG接入电网时的谐波振荡,提高系统稳定性。最后,通过仿真和实验验证了阻抗模型以及相关分析的正确性。

1 VSG 的电网电压前馈控制

1.1 VSG 拓扑结构

图1为VSG的主电路拓扑及控制框图。其中, V_{dc} 为逆变器直流侧电压; $S_{a1}, S_{b1}, S_{c1}, S_{a2}, S_{b2}, S_{c2}$ 为开关管控制信号; e_{abc} 为逆变器三相桥臂输出电压; i_{la}, i_{lb}, i_{lc} 为电感电流; v_{oa}, v_{ob}, v_{oc} 为输出端电压; i_{ga}, i_{gb}, i_{gc} 为三相并网电流; v_{ga}, v_{gb}, v_{gc} 为电网电压; L_f, r_f 分别为滤波电感及其寄生电阻; C_f, r_c 分别为滤波电容及阻尼电阻; Z_g 为电网等效阻抗; P_{set}, Q_{set} 分别为给定有功功率和给定无功功率;PCC为公共连接点。

根据瞬时功率理论可以计算得到有功和无功功率的表达式:

$$\begin{cases} P_e = 1.5(v_\alpha i_\alpha + v_\beta i_\beta) \\ Q_e = 1.5(v_\beta i_\alpha - v_\alpha i_\beta) \end{cases} \quad (1)$$

收稿日期:2021-07-09;修回日期:2021-09-18

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51777095)

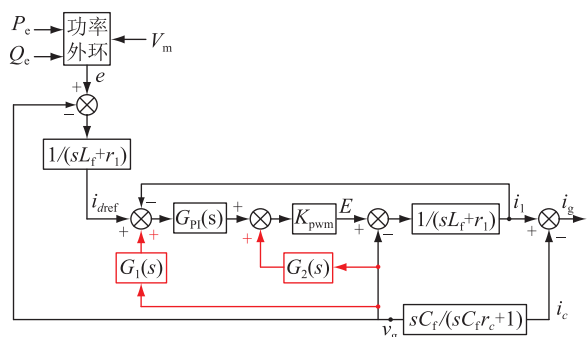


图3 VSG带前馈控制等效结构框图

Fig.3 Equivalent block diagram of VSG with feedforward control

在三相并网逆变器的并网端注入 f_p 频次正序小信号扰动后,以A相为例,VSG的并网电压和并网电流为:

$$v_{ga}(t) = V_1 \cos(2\pi f_1 t) + V_p \cos(2\pi f_p t + \varphi_{v,p}) \quad (8)$$

$$i_{ga}(t) = I_1 \cos(2\pi f_1 t + \varphi_{i,1}) + I_p \cos(2\pi f_p t + \varphi_{i,p}) \quad (9)$$

式中: V_1, V_p 分别为基波电压和正序扰动电压的峰值; I_1, I_p 分别为基波电流和正序扰动电流的峰值; f_1, f_p 分别为基频和正序扰动频率; $\varphi_{v,p}$ 为正序扰动电压初相角; $\varphi_{i,1}, \varphi_{i,p}$ 分别为基波电流和正序扰动电流的初相角。

对并网电压和并网电流进行坐标变换,得到其频域表达式:

$$v_{g\alpha}[f] = \begin{cases} V_1 & f = \pm f_1 \\ V_p & f = \pm f_p \end{cases} \quad (10)$$

$$v_{g\beta}[f] = \begin{cases} \mp jV_1 & f = \pm f_1 \\ \mp jV_p & f = \pm f_p \end{cases} \quad (11)$$

$$i_{g\alpha}[f] = \begin{cases} I_1 & f = \pm f_1 \\ I_p & f = \pm f_p \end{cases} \quad (12)$$

$$i_{g\beta}[f] = \begin{cases} \mp jI_1 & f = \pm f_1 \\ \mp jI_p & f = \pm f_p \end{cases} \quad (13)$$

其中:

$$\begin{cases} V_1 = V_1/2 \\ V_p = (V_p/2)e^{j\varphi_{v,p}} \end{cases} \quad (14)$$

$$\begin{cases} I_1 = (I_1/2)e^{j\varphi_{i,1}} \\ I_p = (I_p/2)e^{j\varphi_{i,p}} \end{cases} \quad (15)$$

将式(10)一式(13)代入式(1),并忽略高次非线性小信号量,得到有功和无功功率在频域的表达式:

$$P_c[f] = \begin{cases} 3(V_1^* I_1 + V_1 I_1^* + V_p^* I_p + V_p I_p^*) & f = 0 \\ 3(V_1^* I_p + V_p I_1^*) & f = \pm(f_p - f_1) \end{cases} \quad (16)$$

$$Q_c[f] = \begin{cases} 3j(V_1^* I_1 - V_1 I_1^* + V_p^* I_p - V_p I_p^*) & f = 0 \\ \pm 3j(V_1^* I_p - V_p I_1^*) & f = \pm(f_p - f_1) \end{cases} \quad (17)$$

其中,上标“*”表示复数的共轭。

将式(16)和式(17)分别代入式(2)和式(3),忽略二次项小信号量,得 θ 和 E_m 在频域的表达式:

$$\begin{cases} \theta[f] = \\ N(s) [3(V_1^* I_1 + V_1 I_1^*)/\omega_r - P_{set}/\omega_r - D_p \omega_r] \\ f = 0 \\ 3N(s) (V_1^* I_p + V_p I_1^*)/\omega_r & f = \pm(f_p - f_1) \end{cases} \quad (18)$$

$$E_m[f] =$$

$$\begin{cases} T(s) [3j(V_1^* I_1 - V_1 I_1^*) - Q_{set} - D_q(V_r - V_m)] \\ f = 0 \\ M(s) V_p \pm 3jT(s) (V_1^* I_p - V_p I_1^*) & f = \pm(f_p - f_1) \end{cases} \quad (19)$$

其中:

$$\begin{cases} N(s) = -1/(Js^2 + D_p s) \\ T(s) = -1/(Ks) \\ M(s) = -D_q/(Ks) \end{cases} \quad (20)$$

对式(4)的A相进行小信号分析,有:

$$e_a = (E_m + \hat{E}_m) \cos(\theta + \hat{\theta}) \quad (21)$$

式中: $\hat{E}_m, \hat{\theta}$ 为三相调制波的电压幅值和相角的小信号。通过简化,A相电压调制小信号为:

$$\hat{e}_a = \hat{E}_m \cos \theta - E_m \hat{\theta} \sin \theta \quad (22)$$

将式(18)和式(19)代入式(22),可得到 f_p 频次下A相电压调制小信号,见式(23)。

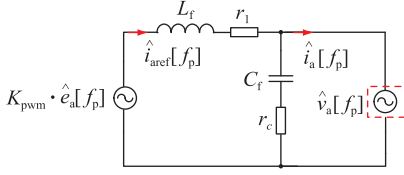
$$\begin{aligned} \hat{e}_a[\pm f_p] = & \pm \frac{3E_m}{2\omega_r} j e^{j\varphi} N(s \mp j2\pi f) (V_1^* I_p + V_p I_1^*) \pm \\ & \frac{3}{2} j e^{j\varphi} T(s \mp j2\pi f_1) (V_1^* I_p - V_p I_1^*) + \\ & \frac{e^{j\varphi}}{2} M(s \mp j2\pi f_1) V_p \end{aligned} \quad (23)$$

当VSG星型连接且对称运行时,VSG输出阻抗可用电压扰动及其激励产生的电流响应计算得到。A相电流响应等效电路如图4所示。

$\hat{v}_a[f_p]$ 和 $\hat{i}_a[f_p]$ 分别为 f_p 频次的电压扰动和电流响应,可得:

$$\hat{i}_{anef}[f_p] = (\hat{e}_a[f_p] - \hat{v}_a[f_p]) / (sL_f + r_f) \quad (24)$$

经图3前馈控制后的A相输出电压调制波为式(25)。再结合图4,得到具有电网电压前馈控制VSG的正序输出阻抗模型,如式(26)所示,同理计算得到并网端注入 f_n 频次负序小信号扰动的负序阻

图4 f_p 频次下 A 相电流响应等效电路Fig.4 Equivalent circuit of A phase current response at f_p

抗模型,如式(27)所示。为便于比较,同时推导出了无电网电压前馈的 VSG 正负序输出阻抗模型,见式(28)和式(29)。

$$\hat{E}_a[\pm f_p] = [(\hat{e}_a[f_p] - V_p)/(sL_f + r_1) - I_p]G_{PI}(s \mp j2\pi f_1) + C_f L_f s^2 + sC_f(r_c + r_1) + 1]V_p/(sC_f r_c + 1) \quad (25)$$

$$Z_p(s) = \frac{A(s) - \frac{3}{4}V_1 j e^{j\varphi} B(s)}{1 - \frac{1}{2}e^{j\varphi} M(s - j2\pi f_1) + \frac{3}{4}I_1 j e^{j(\varphi - \varphi_{i,1})} C(s)} \quad (26)$$

$$Z_n(s) = \frac{A(s) + \frac{3}{4}V_1 j e^{-j\varphi} B(s)}{1 - \frac{1}{2}e^{-j\varphi} M(s + j2\pi f_1) - \frac{3}{4}I_1 j e^{-j(\varphi - \varphi_{i,1})} C(s)} \quad (27)$$

$$Z_{p1}(s) = \frac{sL_f + r_1 - \frac{3}{4}V_1 j e^{j\varphi} B(s)}{R(s) - \frac{e^{j\varphi}}{2}M(s - j2\pi f_1) + \frac{3}{4}I_1 j e^{j(\varphi - \varphi_{i,1})} C(s)} \quad (28)$$

$$Z_{n1}(s) = \frac{sL_f + r_1 + \frac{3}{4}V_1 j e^{-j\varphi} B(s)}{R(s) - \frac{e^{-j\varphi}}{2}M(s + j2\pi f_1) - \frac{3}{4}I_1 j e^{-j(\varphi - \varphi_{i,1})} C(s)} \quad (29)$$

其中:

$$G_{PI}(s) = k_p + k_i/s \quad (30)$$

$$A(s) = \begin{cases} \frac{(sL_f + r_1)(sL_f + r_1 + G_{PI}(s - j2\pi f_1))}{G_{PI}(s - j2\pi f_1)} & f = f_p \\ \frac{(sL_f + r_1)(sL_f + r_1 + G_{PI}(s + j2\pi f_1))}{G_{PI}(s + j2\pi f_1)} & f = f_n \end{cases} \quad (31)$$

$$B(s) = \begin{cases} T(s - j2\pi f_1) + \frac{E_m}{\omega_r} N(s - j2\pi f_1) & f = f_p \\ T(s + j2\pi f_1) + \frac{E_m}{\omega_r} N(s + j2\pi f_1) & f = f_n \end{cases} \quad (32)$$

$$C(s) = \begin{cases} T(s - j2\pi f_1) - \frac{E_m}{\omega_r} N(s - j2\pi f_1) & f = f_p \\ T(s + j2\pi f_1) - \frac{E_m}{\omega_r} N(s + j2\pi f_1) & f = f_n \end{cases} \quad (33)$$

$$R(s) = (L_f C_f s^2 + r_1 C_f s + r_c C_f s + 1)/(r_c C_f s + 1) \quad (34)$$

2.2 阻抗特性分析

依据表 1 参数数据绘制有、无电网电压前馈控制的输出阻抗模型对比图,如图 5 所示。

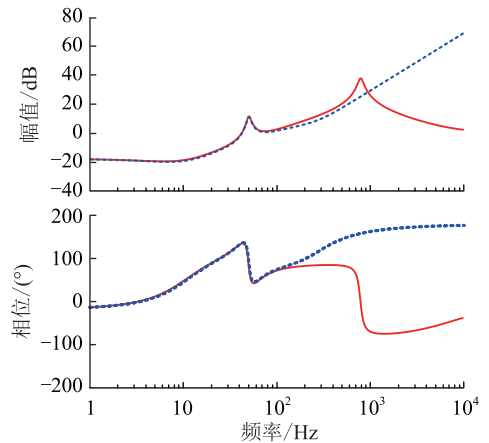
表 1 VSG 主要参数

Table 1 Main parameters of the VSG

参数	数值	参数	数值
阻尼系数 D_p	10	直流侧电压 V_{dc}/V	700
虚拟转动惯量 J	0.02	额定电压幅值 E_m/V	311
调压系数 D_q	200	滤波电感 L_f/mH	2
励磁调节积分系数 K	6	电感阻尼电阻 r_l/Ω	0.3
额定有功功率 P_{set}/W	6 000	滤波电容 $C_f/\mu F$	20
额定无功功率 Q_{set}/var	0	电容阻尼电阻 r_c/Ω	1
开关频率 f_s/kHz	20	电流环比例系数 k_p	6
基波频率 f_1/Hz	50	电流环积分系数 k_i	11 000

由图 5 可知,在低频段 2 种控制策略下的阻抗模型曲线完全重合,而在高频段带前馈控制的阻抗模型由容性提升为感性。针对各控制环节与阻抗模型的关系有如下分析。

(1) 功率外环与阻抗模型的关系。VSG 低频段阻抗特性与电流内环和电网电压前馈控制无关,仅表现为功率外环特性,受功率外环控制参数影响。



(a) 正序阻抗曲线

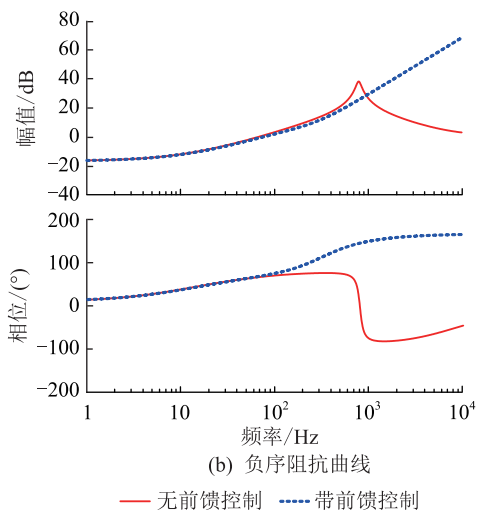


图5 2种控制下的VSG输出阻抗模型

Fig.5 VSG output impedance models of two controls

(2) 电流内环与阻抗模型的关系。当扰动频率 f_p 很高时, s 趋于无穷, 表达式 $T(s), N(s), M(s)$ 以及 PI 调节器中的积分项 k_i/s 趋于零, 式 (26) 和式 (27) 的正负序阻抗模型可简化为式 (35)。可知, 高频段阻抗曲线主要受滤波电感 L_f 以及电流环比例调节系数 k_p 影响。

$$Z'(s) = \frac{(sL_f + r_1)(sL_f + r_1 + k_p)}{k_p} \quad (35)$$

图6和图7表现了带前馈控制阻抗特性曲线与电流内环PI控制器的比例系数 k_p 、积分系数 k_i 之间的关系。结合两图与式(35)可知, 当 k_p 减小到一定程度, 或者 k_i 增大至一定程度时, 相位可能过大, 造成谐波振荡; k_p 对 10 kHz 以上的频段阻抗幅值有影响, 相位无影响, 且相位最终都趋近于 180° 。

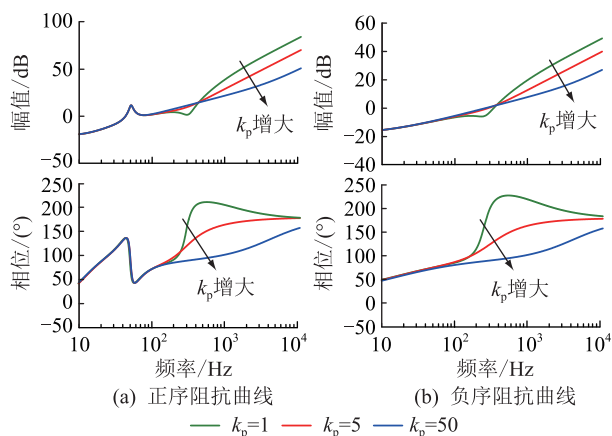


图6 k_p 与带前馈控制VSG输出阻抗的关系

Fig.6 Relationship between k_p and output impedance of VSG with feedforward control

(3) 前馈环节与阻抗模型的关系。根据图3中电网电压前馈控制, 可以得到VSG的等效控制框图, 如图8所示。前馈控制传递函数可等效为虚拟

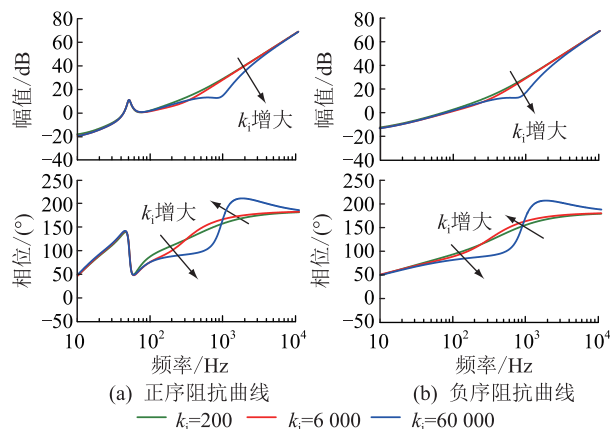


图7 k_i 与带前馈控制VSG输出阻抗的关系

Fig.7 Relationship between k_i and output impedance of VSG with feedforward control

导纳, 与电流环输出阻抗并联, 从而对VSG输出阻抗产生影响。

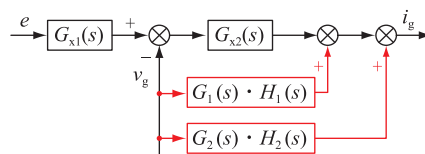


图8 前馈控制下的VSG等效控制框图

Fig.8 Equivalent control block diagram of VSG with feedforward control

图8中各等效传递函数分别为:

$$G_{x1}(s) = \frac{G_{PI}(s)}{(sL_f + r_1)H(s)} \quad (36)$$

$$G_{x2}(s) = \frac{H(s)}{sL_f + r_1 + G_{PI}(s)} \quad (37)$$

$$H(s) = \left(\frac{1}{sL_f + r_1} + \frac{sC_f}{sC_f r_c + 1} \right) G_{PI}(s) + R(s) \quad (38)$$

$$H_1(s) = \frac{G_{PI}(s)}{sL_f + r_1 + G_{PI}(s)} \quad (39)$$

$$H_2(s) = \frac{1}{sL_f + r_1 + G_{PI}(s)} \quad (40)$$

为了分析前馈函数对阻抗的作用, 结合式(7)可得前馈传递函数的伯德图, 如图9所示。由图可知, $G_1(s)$ 对小信号始终衰减, 而 $G_2(s)$ 对VSG的阻抗特性高频小信号有放大作用, 可改善调制波波形。同时, $G_2(s)$ 导致相位超前, 改变VSG阻抗高频段呈容性的特点, 使相位大于 0° , 提高其与电网阻抗幅频曲线交截点处的相角裕度, 改善并网稳定性。

3 并网稳定性分析

当VSG并网时, 由阻抗分析法^[23]可知, 系统的

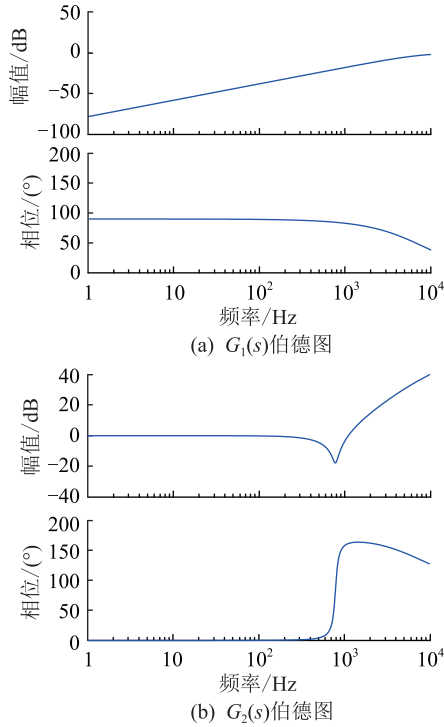


图9 电网电压前馈函数伯德图

Fig.9 Bode diagram of grid voltage feedforward function

稳定性可通过判断电网阻抗与 VSG 输出阻抗比值 $Z_g(s)/Z_o(s)$ 是否满足奈奎斯特稳定判据进行证明。当 $Z_g(s)$ 与 $Z_o(s)$ 的幅频曲线相交频率点处的相角裕度 $\gamma = 180^\circ - |\angle Z_g(s) - \angle Z_o(s)| > 0^\circ$ 时,系统稳定。在工程应用中,为增加交互系统的鲁棒性,通常要求 $\gamma > 30^\circ$ 。

3.1 无前馈控制时的 VSG 并网稳定性

无前馈控制时的 VSG 正负序阻抗与电网阻抗曲线如图 10 所示,电网阻抗值 L_g 分别取为 3 mH, 8 mH 和 14 mH。

通过分析阻抗幅频曲线交截点处的相位裕度可以发现,当电网阻抗 $L_g = 3$ mH 时,受 LC 滤波谐振的影响,VSG 高频段正负序阻抗均呈容性,电网阻抗与正负序阻抗在 1 028 Hz 产生交截,交互系统的

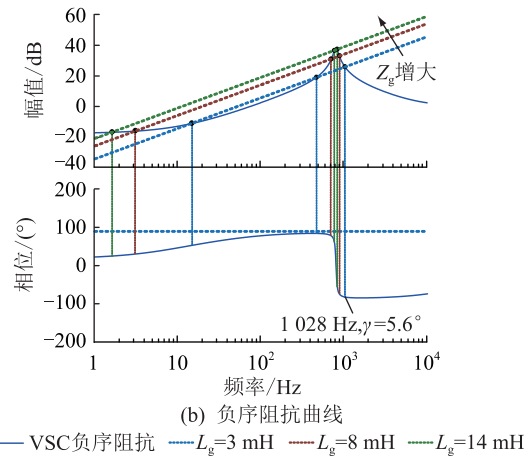
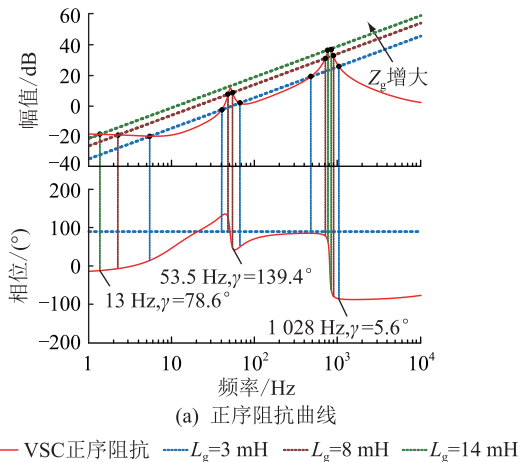


图10 无前馈控制下的 VSG 与电网阻抗特性曲线
Fig.10 Sequence impedance curves of VSG without feedforward control and grid

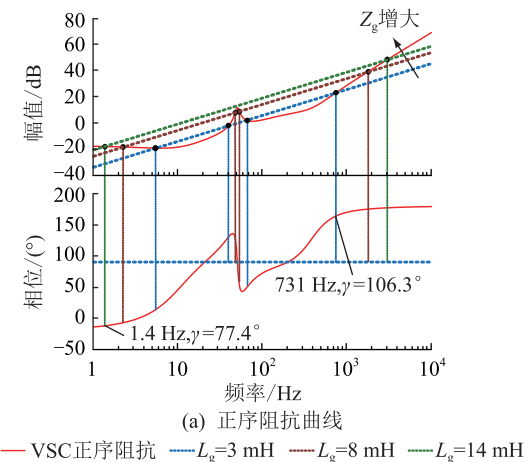
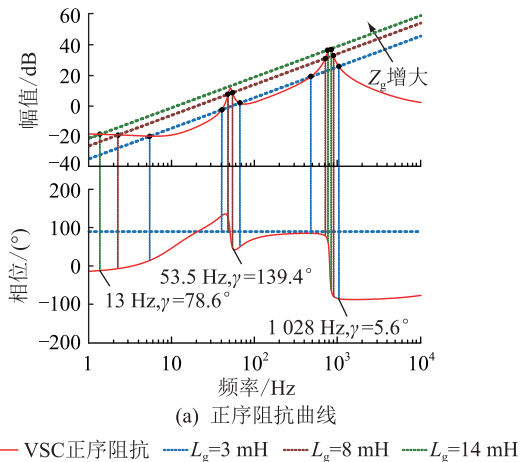
相位裕度 $\gamma = 5.6^\circ$, 不满足实际工程的稳定性要求,若电网在该频次含有很小的背景谐波则极易引起整个系统的振荡。而当电网阻抗 $L_g = 14$ mH 时,高频段交截点的相位裕度满足 $\gamma > 30^\circ$,系统能够稳定运行。由此可知,当电网阻抗 L_g 较小时,其与 VSG 阻抗模型在高频段幅频曲线交截点处的相角裕度不满足工程稳定性要求。在实际应用中,通常通过适当增加阻尼电阻 r_c 以改善并网系统的高频谐振,增加系统稳定性^[24-26]。

3.2 带前馈控制时的 VSG 并网稳定性

带前馈控制时的 VSG 正负序阻抗与电网阻抗曲线如图 11 所示,通过分析图中正负序阻抗幅频曲线交截点处的相位裕度可以发现,交互系统均满足 $\gamma > 30^\circ$,即无论电压阻抗如何变化,电网电压前馈控制下的 VSG 并网交互系统均能够稳定运行。

4 实验验证及分析

为了验证前文理论分析的正确性,分别设计相应的仿真模型和实验平台,开展验证分析。



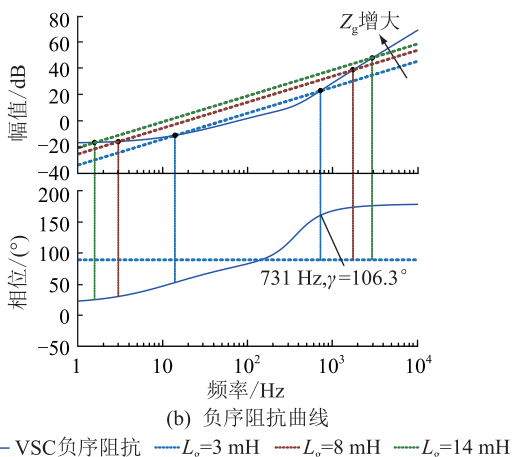


图 11 带前馈控制下的 VSG 与电网阻抗特性曲线
Fig.11 Sequence impedance curves of VSG with feedforward control and grid

4.1 VSG 输出阻抗模型验证

首先,为了验证理论阻抗模型的准确性,利用 Matlab 搭建带前馈控制的 VSG 仿真模型。在公共连接点注入不同频率的电压扰动信号,测量对应频率下的电流响应信号,求解该频率下的实测阻抗。VSG 正、负序阻抗伯德图和仿真扫描结果如图 12 所示。

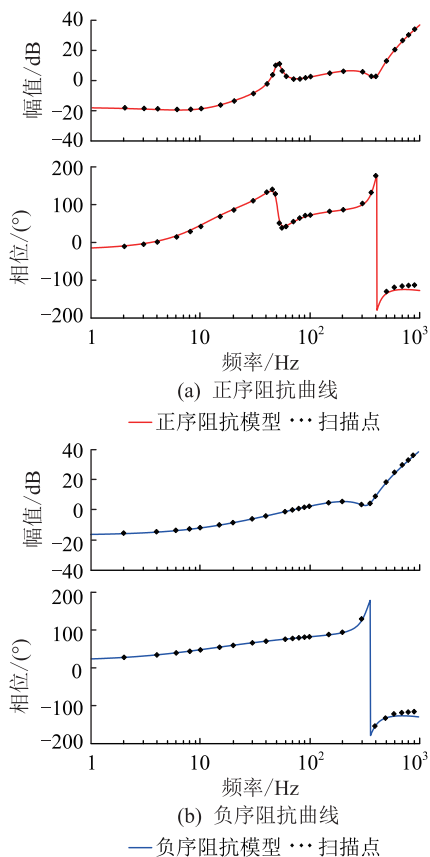


图 12 带前馈控制下的 VSG 输出阻抗测量
Fig.12 Sequence impedance measurement of VSG with feedforward control

由图 12 可以看出,理论阻抗曲线与测量结果非常吻合,验证了所建立模型的准确性。

4.2 VSG 并网稳定性实验验证

基于实时仿真实验平台 (real-time laboratory, RT-LAB) 建立 VSG 并网的硬件在环实验平台。图 13 为 RT-LAB 平台系统结构。外部数字信号处理器 (digital signal processor, DSP) 控制器实现 VSG 的控制电路,RT-LAB 平台仿真模拟 VSG 接入不同电网的系统主功率电路,并通过平台自带的数/模转换接口实现输出采样和输入控制。

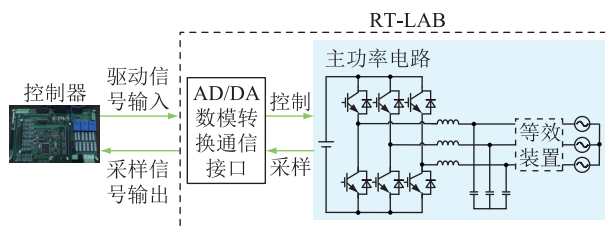


图 13 RT-LAB 平台系统结构

Fig.13 System structure of RT-LAB platform

为验证电网电压前馈控制对背景谐波的抑制效果,在电网中人为注入 5 次、7 次以及 11 次谐波来模拟电网电压的背景谐波。图 14 给出加入电网电压前馈控制前后的并网电流对比波形。

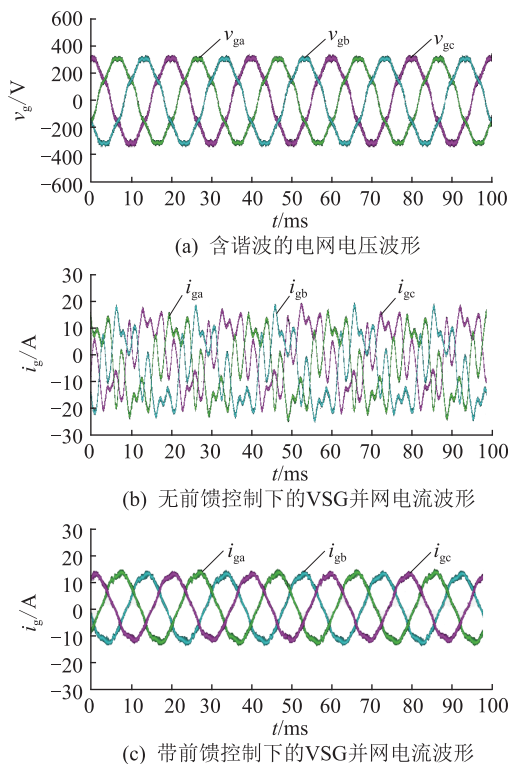


图 14 电网含谐波条件下实验波形

Fig.14 Experimental waveforms when grid has harmonics

由图 14 可以看出,采用电网电压前馈控制后, VSG 的输出电流波形比无前馈控制时谐波含量显

著减少。实验结果说明了电网电压前馈控制可以消除电网电压背景谐波对并网电流的影响,改善波形质量。同时,也验证了前文前馈控制环节设计与分析的正确性。

为验证电网电压前馈控制对并网稳定性的影响,取电网阻抗 L_g 为 3 mH,且含少量背景谐波。图 15、图 16 给出加入电网电压前馈控制前后的并网电流波形及快速傅里叶变换 (fast Fourier transformation, FFT) 分析对比, M 为其他频率电流与 50 Hz 频率电流的比值。

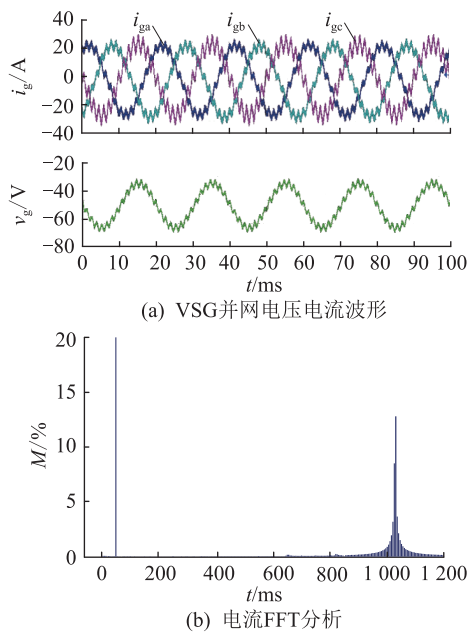


图 15 无前馈控制下的 VSG 并网电压电流分析

Fig.15 Grid-connected voltage and current analysis of VSG without feedforward control

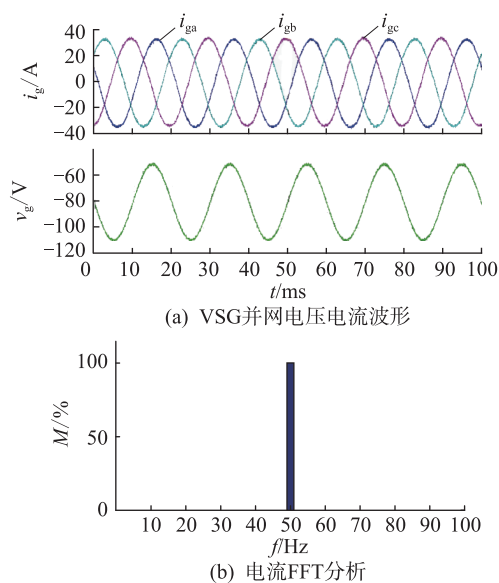


图 16 带前馈控制下的 VSG 并网电压电流分析

Fig.16 Grid-connected voltage and current analysis of VSG with feedforward control

由图 15、图 16 可以看出,无前馈控制时,受电网背景谐波的扰动,VSG 的并网电流出现明显的振荡。FFT 分析结果显示,并网电流在 1 028 Hz 频率处出现了大量的谐波,该频率与图 10 中的理论分析完全吻合。而采用前馈控制后,VSG 并网电流波形及 FFT 分析显示并网电流谐波含量极小,验证了图 11 中理论分析的正确性。

5 结论

VSG 作为一种友好型的并网装置,不仅可以模拟传统 SG 的动静态特性,为电网提供惯量阻尼和有功无功支撑,还可以改善并网条件下的稳定性。文中针对非理想电网场合,在 VSG 中引入基于电流环的电网电压前馈控制,对有、无电网电压前馈控制的 VSG 阻抗特性及并网稳定性开展深入研究并进行实验验证,得到如下结论:

(1) 电网电压前馈控制的引入可以消除电网电压背景谐波对并网电流的影响,显著改善非理想电网条件下 VSG 的并网电流波形质量;

(2) 引入电网电压前馈控制相当于在 VSG 的输出端并联虚拟阻抗,改变了 VSG 的中高频段阻抗特性,使其不再呈容性,抑制了并网条件下的高频谐波振荡,提高了交互系统稳定性。

参考文献:

- [1] 竺庆茸,黄文杰,徐修华,等. 分布式能源对主动配电网谐波特性影响的研究[J]. 电力工程技术,2017,36(5):93-97,108.
- ZHU Qingrong,HUANG Wenjie,XU Xiuhua,et al. The impact of distributed energy on harmonic characteristics in active distribution network [J]. Electric Power Engineering Technology, 2017,36(5):93-97,108.
- [2] WOJSZCZYK B,ALJUBURI O,王靖. 分布式发电的高覆盖率对电力系统设计和运行的影响分析(英文)[J]. 电网技术,2009,33(15):37-46.
- WOJSZCZYK B,ALJUBURI O,WANG Jing. Impact of high penetration of distributed generation on system design and operations[J]. Power System Technology,2009,33(15):37-46.
- [3] LIU J,MIURA Y,ISE T. Comparison of dynamic characteristics between virtual synchronous generator and droop control in inverter-based distributed generators[J]. IEEE Transactions on Power Electronics,2016,31(5):3600-3611.
- [4] 孟建辉,彭嘉琳,王毅,等. 多约束下光储系统的灵活虚拟惯性控制方法[J]. 电工技术学报,2019,34(14):3046-3058.
- MENG Jianhui,PENG Jialin,WANG Yi,et al. Multi-constrained flexible virtual inertial control method for photovoltaic energy storage system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2019,34(14):3046-3058.
- [5] 孔祥平,冯畅,丁昊,等. 虚拟电机技术应用前景和发展方向

- [J]. 电力工程技术,2017,36(5):35-44.
KONG Xiangping, FENG Chang, DING Hao, et al. Application prospective and development trends of virtual generator technology[J]. Electric Power Engineering Technology,2017,36(5):35-44.
- [6] ZHONG Q C, WEISS G. Synchronverters; inverters that mimic synchronous generators[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics,2011,58(4):1259-1267.
- [7] 吕志鹏,梁英,曾正,等. 应用虚拟同步电机技术的电动汽车快充控制方法[J]. 中国电机工程学报,2014,34(25):4287-4294.
LYU Zhipeng, LIANG Ying, ZENG Zheng, et al. Virtual synchronous motor based control scheme of fast charger for electric vehicle application [J]. Proceedings of the CSEE,2014,34(25):4287-4294.
- [8] D'ARCO S, SUUL J A, FOSSO O B. A virtual synchronous machine implementation for distributed control of power converters in smart grids[J]. Electric Power Systems Research,2015,122:180-197.
- [9] 张波,颜湘武,黄毅斌,等. 虚拟同步机多机并联稳定控制及其惯量匹配方法[J]. 电工技术学报,2017,32(10):42-52.
ZHANG Bo, YAN Xiangwu, HUANG Yibin, et al. Stability control and inertia matching method of multi-parallel virtual synchronous generators[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2017,32(10):42-52.
- [10] 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.
- [11] 任碧莹,邱姣姣,刘欢,等. 基于虚拟同步发电机双机并联系统的参数自调节优化控制策略[J]. 电工技术学报,2019,34(1):128-138.
REN Biying, QIU Jiaojiao, LIU Huan, et al. Optimization control strategy of self-adjusting parameter based on dual-parallel virtual synchronous generators[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2019,34(1):128-138.
- [12] JIA Y Q, ZHAO J Q, FU X W. Direct grid current control of LCL-filtered grid-connected inverter mitigating grid voltage disturbance[J]. IEEE Transactions on Power Electronics,2014,29(3):1532-1541.
- [13] 李坤,郑文帅,马超,等. 基于单相逆变器的比例谐振控制设计[J]. 电气技术,2019,20(12):23-27,45.
LI Kun, ZHENG Wenshuai, MA Chao, et al. Proportional resonant control design based on single phase inverter[J]. Electrical Engineering,2019,20(12):23-27,45.
- [14] 肖力元,张伊洁,李云涛. 三相并网逆变器无差拍双闭环控制方法[J]. 浙江电力,2019,38(4):28-33.
XIAO Liyuan, ZHANG Yijie, LI Yuntao. Three-phase grid-connected inverter deadbeat double closed-loop control method [J]. Zhejiang Electric Power,2019,38(4):28-33.
- [15] 赵强松,陈莎莎,周晓宇,等. 用于并网逆变器谐波抑制的重复-比例复合控制器分析与设计[J]. 电工技术学报,2019,34(24):5189-5198.
ZHAO Qiangsong, CHEN Shasha, ZHOU Xiaoyu, et al. Analysis and design of combination controller based on repetitive control and proportional control for harmonics suppression of grid-tied inverters[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2019,34(24):5189-5198.
- [16] 孙孝峰,曾健,李宁宁,等. 并联有源滤波器网侧谐波电流反馈控制[J]. 电工技术学报,2012,27(10):150-154,181.
SUN Xiaofeng, ZENG Jian, LI Ningning, et al. Improvement for the closed-loop control of shunt active power filter based on feedback of supply-side current [J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2012,27(10):150-154,181.
- [17] LI W W, RUAN X B, PAN D H, et al. Full-feedforward schemes of grid voltages for a three-phase LCL-type grid-connected inverter[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics,2013,60(6):2237-2250.
- [18] 杨东升,阮新波,吴恒. 提高LCL型并网逆变器对弱电网适应能力的虚拟阻抗方法[J]. 中国电机工程学报,2014,34(15):2327-2335.
YANG Dongsheng, RUAN Xinbo, WU Heng. A virtual impedance method to improve the performance of LCL-type grid-connected inverters under weak grid conditions[J]. Proceedings of the CSEE,2014,34(15):2327-2335.
- [19] WU W H, ZHOU L M, CHEN Y D, et al. Sequence-impedance-based stability comparison between VSGs and traditional grid-connected inverters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics,2019,34(1):46-52.
- [20] WU W H, CHEN Y D, ZHOU L M, et al. Sequence impedance modeling and stability comparative analysis of voltage-controlled VSGs and current-controlled VSGs[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics,2019,66(8):6460-6472.
- [21] 陈杰,申朋朋,魏涛,等. 非理想电网条件下的同步逆变器控制策略[J]. 电力系统自动化,2018,42(9):127-133.
CHEN Jie, SHEN Pengpeng, WEI Tao, et al. Control scheme for synchronverters under non-ideal grid condition [J]. Automation of Electric Power Systems,2018,42(9):127-133.
- [22] 吴盼,汪可友,徐晋,等. 基于CPU-FPGA异构平台的虚拟同步并网逆变器实时仿真算法设计[J]. 电力系统保护与控制,2020,48(14):85-94.
WU Pan, WANG Keyou, XU Jin, et al. Real-time simulation algorithm design of a virtual synchronous grid-connected inverter system based on a CPU-FPGA heterogeneous platform [J]. Power System Protection and Control,2020,48(14):85-94.
- [23] 魏涛. 同步逆变器的阻抗建模及并网稳定性分析[D]. 南京:南京航空航天大学,2018.
WEI Tao. Impedance modeling and grid connection stability analysis of synchronverter [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics,2018.
- [24] 陈新,王赞程,华森杰,等. 采用混合阻尼自适应调整的并网逆变器控制方法[J]. 中国电机工程学报,2016,36(3):765-774.
CHEN Xin, WANG Yuncheng, HUA Miaojie, et al. Grid-con-

- nected inverters control schemes based on hybrid damping adaptive control[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(3): 765-774.
- [25] 黄亮,杨雪梅,张锐明,等. 基于 LLCL 滤波器混合阻尼策略设计方法[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(9): 150-156. HUANG Liang, YANG Xuemei, ZHANG Ruiming, et al. Design method of hybrid damping strategy based on an LLCL filter [J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(9): 150-156.
- [26] 阮新波,王学华,潘冬华. LCL 型并网逆变器的控制技术[M]. 北京:科学出版社, 2015. RUAN Xinbo, WANG Xuehua, PAN Donghua. Control techni-

ques for LCL-type grid-connected inverters[M]. Beijing: Science Press, 2015.

作者简介:



杨伊茜

杨伊茜(1997),女,硕士在读,研究方向为新能源变换、并网逆变器和阻抗分析(E-mail: 545246106@qq.com);

陈杰(1982),男,博士,副教授,研究方向为电力电子变换装置、系统的建模、控制与设计;

万雨朦(1994),女,硕士,研究方向为新能源发电技术。

The impedance modelling and stability analysis of VSG with grid voltage feedforward control

YANG Yiqian¹, CHEN Jie¹, WAN Yumeng¹, ZHANG Xinying¹, WANG Kaichun²

(1. School of Automation, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China;

2. Beijing Institute of Precision Mechatronics and Controls, Beijing 100076, China)

Abstract: To solve the problems of current quality decreasing and poor grid stability of virtual synchronous generator (VSG) under the condition containing background harmonic, a power grid voltage feedforward control strategy based on current loop for VSG is proposed. In order to eliminate the influence of grid voltage background harmonics on grid connected current, the voltage feedforward control function is derived according to the input current transfer function. The impedance model of VSG with and without feedforward control are established based on the harmonic linearization method. The influence on both the impedance characteristics at different frequency range and stability of grid connection are compared and analyzed. The results show that the introduction of the feedforward control is equivalent to parallel virtual impedance at the output of VSG, so the amplitude frequency curve of output impedance in high frequency band moves up, which can improve the grid connected current quality under non ideal grid conditions. At the same time, the phase frequency characteristics of medium and high frequency band are corrected from capacitive to inductive, which can eliminate the risk of harmonic oscillation under grid connected conditions, and improve the stability of interactive system. Finally, a hardware in the loop experimental platform is built to verify the correctness of the control strategy model and related analysis.

Keywords: virtual synchronous generator (VSG); background harmonics; grid voltage feedforward control; harmonic linearization; impedance modeling; stability of the grid connection

(编辑 钱悦)