

不平衡电压下 VSG 无锁相环并网及运行控制策略

奚鑫泽^{1,2}, 徐志¹, 洪灏灏³, 顾伟³

(1. 云南电网有限责任公司电力科学研究院, 云南 昆明 650217; 2. 重庆大学电气工程学院, 重庆 400044; 3. 东南大学电气工程学院, 江苏 南京 210096)

摘要:针对并网逆变器在不平衡电压下电流畸变严重和锁相环节复杂等问题,文中设计了一种基于改进虚拟同步机(VSG)的逆变器无锁相环控制策略。重点研究了VSG在不平衡电网电压下的运行控制方法,设计了一种基于比例积分谐振(PIR)控制器的改进VSG控制策略,在不改变VSG外特性的基础上有效抑制了逆变器输出电流的不平衡分量。同时,提出一种基于虚拟功率的VSG预同步控制策略,保证VSG孤岛转并网模式的无缝切换。整个控制过程不依赖锁相环,避免了锁相环对系统控制精度以及响应速度的影响,降低了控制系统的复杂度。最后,基于RT-LAB的实时仿真平台对所提控制策略进行了验证。

关键词:虚拟同步机;不平衡电压;平滑切换;无锁相环;RT-LAB

中图分类号:TM721

文献标志码:A

文章编号:2096-3203(2019)03-0080-07

0 引言

分布式新能源发电技术是当今研究的热点^[1],然而,分布式发电系统缺乏惯性和阻尼,更容易受到功率波动和系统故障的影响^[2]。为了解决这一问题,国内外很多学者都提出了虚拟同步机(virtual synchronous generator, VSG)的概念^[3-5]。通过模拟同步电机的机电暂态方程,使得带有储能的逆变系统具有惯量与阻尼特性,能主动地参与电网的调频调压以及阻尼功率振荡的工作。

目前对于VSG的研究主要针对于三相平衡的系统,然而配电网在故障或者非全相运行等状态下很容易呈现三相电压不平衡的状况。文献[6-7]分析了不平衡电压下运行对逆变器的危害,并给出了一种抑制功率波动和电流畸变的协调控制方法。文献[8]提出了一种改进VSG控制策略,可以分别实现VSG在不平衡电压下输出电流平衡或者功率稳定的目标。文献[9]针对负载不平衡的情况,提出了一种基于自适应谐振的改进VSG控制方法,控制系统简单,但是没有对不平衡电压下的并网运行控制作出研究。

由于锁相单元的动态特性影响系统的控制性能,并网逆变器的无锁相环控制策略得到越来越多的关注^[10-11]。文献[11]分析了不平衡电压对常规锁相环的影响。文献[12]详细地分析了锁相环的动态特性,从理论上得到了锁相环可能会造成系统

失稳的结论。VSG在孤岛或并网模式下均可以自动生成相位参考,而不需要额外增加锁相单元,为无锁相环控制策略提供了新的思路^[13]。然而,目前对于VSG离并网模式切换的预同步过程主要还是基于锁相环的电压定向控制^[14],对于适应于VSG运行的无锁相环模式切换控制策略研究还很欠缺。

文中在典型的VSG二阶模型的基础上,提出一种不平衡电压下逆变器并网运行控制策略。采用基于比例积分谐振(proportional integral resonant, PIR)的电流内环控制,在电网电压不平衡的工况下仍然保证三相电流平衡,并提出一种基于虚拟功率的VSG离并网预同步控制策略,保证运行模式的无缝切换。整体控制策略避免使用锁相环,提高了系统的稳定性和可靠性。最后在基于RT-LAB的实时仿真平台上进行了相关策略验证。

1 VSG 建模与控制研究

1.1 VSG 拓扑结构

图1是VSG电路拓扑结构,其中 $e_{abc} = [e_a, e_b, e_c]$, $u_{abc} = [u_a, u_b, u_c]$, $u_{gabc} = [u_{ga}, u_{gb}, u_{gc}]$ 分别为VSG空载电势、机端电压和电网侧电压; $i_{abc} = [i_a, i_b, i_c]$ 是VSG的输出电流; L_s, C_s 分别为VSG输出滤波电感和电容; L_g 为线路电感。VSG主电路拓扑结构和典型的并网型逆变器类似,主要通过控制回路中加入同步电机的转子运动方程和定子电气方程,模拟同步电机机械运动和电磁关系,使得整个逆变系统呈现同步电机类似的输出特性。

1.2 VSG 有功-频率环

VSG模拟同步电机有功下垂的外特性,如式

收稿日期:2018-12-23;修回日期:2019-02-15

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2016YFB0900200);

国家自然科学基金资助项目(51707026)

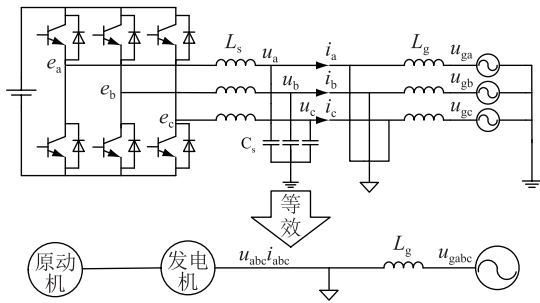


图1 VSG 电路拓扑

Fig.1 Topology of virtual synchronous generator

(1)所示:

$$P_m = P_{ref} + K_\omega(\omega_{ref} - \omega) \quad (1)$$

式中: P_{ref} , ω_{ref} 分别为 VSG 工作在额定工况下的机械功率和角速度; P_m , ω 分别为 VSG 实际工作时的机械功率和角速度; K_ω 为有功频率下垂系数。

VSG 在下垂控制的基础上,加入转子的机械运动方程来模拟惯量和阻尼。

$$\begin{cases} T_m - T_e - D(\omega - \omega_g) = J \frac{d\omega}{dt} \\ T_m = \frac{P_m}{\omega} \\ T_e = \frac{P_e}{\omega_g} \end{cases} \quad (2)$$

式中: T_m , T_e 分别为 VSG 机械转矩和电磁转矩; P_m , P_e 分别为机械功率和电磁功率; D , J 分别为阻尼系数和转动惯量; ω_g 为电网侧同步角速度。

由于 VSG 在稳定运行时输出频率和电网侧的频率均稳定在 50 Hz 左右,因此在实际控制中,通常做出简化: $\omega \approx \omega_g \approx \omega_{ref}$ 。结合式(1)、(2),可以得到:

$$\frac{P_{ref}}{\omega_{ref}} - \frac{P_e}{\omega_{ref}} - \left(D + \frac{K_\omega}{\omega_{ref}} \right) (\omega - \omega_{ref}) = J \frac{d\omega}{dt} \quad (3)$$

1.3 VSG 无功-电压环

VSG 模拟同步发电机的无功调节能力,通过无功以及电压的下垂特性来实现无功调压的功能。

$$E = E_0 + K_q(Q_{ref} - Q) \quad (4)$$

式中: E_0 , Q_{ref} 分别为 VSG 在额定工况下的机端电压和输出的无功功率; E , Q 分别为 VSG 实际工作时的机端电压和输出的无功功率; K_q 为无功电压下垂系数。

1.4 VSG 不平衡运行控制框架

传统 VSG 控制都基于三相电网电压平衡的设置,然而在配电网的末端,电网电压很容易受到干扰而呈现三相不平衡的状态,在传统 VSG 控制模式下会出现并网电流畸变和功率波动的现象,因此,建立 VSG 在不平衡电压下稳定运行的控制框架至

关重要。

由于 VSG 本身具有惯性,在孤岛模式和并网转孤岛控制时不需要附加控制即可稳定运行。因此文中研究重点是 VSG 在不平衡电压下的并网控制和孤岛转并网模式下的预同步控制,提出的整体控制框架如图 2 所示。



图2 不平衡电压下 VSG 运行框架

Fig.2 Framework of VSG under unbalanced grid voltage

2 VSG 不平衡电压下并网运行控制

2.1 不平衡电压下 VSG 运行特性分析

首先由对称分量法以及瞬时功率理论^[15]可知,在电网存在负序分量时,输出功率可以分解为平均部分和振荡部分,如式(5)所示:

$$\begin{cases} \bar{p} = 3V_+ I_+ \cos(\varphi_{v+} - \varphi_{i+}) + 3V_- I_- \cos(\varphi_{v-} - \varphi_{i-}) \\ \bar{q} = 3V_+ I_+ \sin(\varphi_{v+} - \varphi_{i+}) - 3V_- I_- \sin(\varphi_{v-} - \varphi_{i-}) \\ \tilde{p} = -3V_+ I_- \cos(2\omega t + \varphi_{v+} + \varphi_{i+}) - 3V_- I_+ \cos(2\omega t + \varphi_{v-} + \varphi_{i+}) \\ \tilde{q} = -3V_+ I_- \sin(2\omega t + \varphi_{v+} + \varphi_{i+}) + 3V_- I_+ \sin(2\omega t + \varphi_{v-} + \varphi_{i+}) \end{cases} \quad (5)$$

式中: \bar{p} , \tilde{p} 分别为输出有功功率的平均分量和振荡分量; \bar{q} , \tilde{q} 分别为输出无功功率的平均分量和振荡分量; V_+ , V_- 分别为正序、负序电压的有效值; I_+ , I_- 分别为正序、负序电流的有效值; φ_{v+} , φ_{v-} 分别为正序、负序电压的初相位; φ_{i+} , φ_{i-} 分别为正序、负序电流的初相位。

在电网电压不平衡的情况下,无法同时实现电网电流平衡和有功无功功率稳定的控制目标^[16]。因此,在对并网电流质量要求较高的场合,应该优先实现电网电流三相平衡。由式(5)可知,实现电网电流三相平衡也能在一定程度上减小功率振荡分量。

2.2 基于 PIR 电流内环控制

为了抑制电流负序分量,文中采用 PIR 电流内

环控制器,在不分离负序分量的前提下同时实现对正负序电流的控制,该 PIR 控制器的传递函数如下:

$$G_{\text{PIR}}(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + \frac{2K_r\omega_c s}{s^2 + 2\omega_c s + \omega_n^2} \quad (6)$$

式中: K_p 为比例系数; K_i 为积分系数; K_r 为谐振系数; ω_n 为谐振频率,文中设计为 2 倍工频; ω_c 为截止角频率,决定了谐振控制器的带宽。基于 PIR 控制器的内环电流控制如图 3 所示, L_s 为滤波器的电感; $k_{\text{pir}}, k_{\text{pwm}}$ 分别为 PIR 控制器和调制模块的增益。

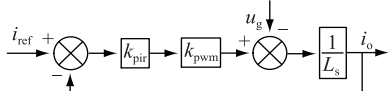


图 3 基于 PIR 控制器的内环电流控制

Fig.3 Control loop of inner current based on PIR controller

如图 3 所示,电网电压 u_g 引入了负序分量,经过正序旋转坐标变换, u_g 变为直流量和 2 倍工频交流量的叠加。根据内模原理,控制器中的比例积分 (proportional integral, PI) 部分可以实现对直流量的无差跟踪,比例谐振 (proportional resonant, PR) 部分则可以实现对交流量的无差跟踪。为了实现对负序分量的抑制,将负序分量的参考值直接设置为零即可。

$$\frac{i_o}{i_{\text{ref}}} = \frac{k_{\text{pir}}k_{\text{pwm}}}{L_s + k_{\text{pir}}k_{\text{pwm}}} \quad (7)$$

基于 PIR 控制器的电流内环控制回路输入输出传递函数如式 (7) 所示,可以得到频率特性曲线和 PI 控制器的对比如图 4 所示。可以看出,和传统的 PI 控制器相比,系统在低频下的控制特性不变,仍能实现对直流信号的无差跟随。加入谐振控制器之后,系统在 2 倍工频处控制性能明显改善,幅值增益在 0 dB 左右,跟踪相角差也在 0° 左右,因此,系统同时能够实现对 2 倍工频分量的控制。

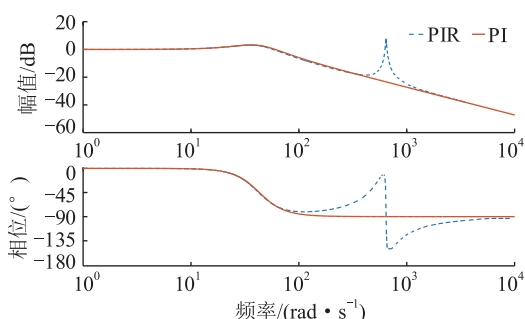


图 4 基于 PIR/PI 控制器的内环电流控制频谱

Fig.4 Spectrum of inner current loop based on PIR/PI controller

2.3 平衡正序控制

文中从电路结构入手,在只考虑正序分量的前提下,由图 (1) 可得电流和电压的关系如下:

$$i^p = \frac{U_{\text{vsg}} - U_{\text{grid}}^p}{R_g + j\omega L_g} \quad (8)$$

式中: i^p 为电流的正序分量; U_{vsg} 为 VSG 机端电压; U_{grid}^p 为电网侧电压的正序分量; R_g, L_g 分别为连接线路上的电阻和电感。

转化到 dq 坐标系下得到以下方程:

$$\begin{bmatrix} i_d^p \\ i_q^p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_g s + R_g & -\omega L_g \\ \omega L_g & L_g s + R_g \end{bmatrix}^{-1} \left(\begin{bmatrix} U_d \\ U_q \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} U_{gd}^p \\ U_{gq}^p \end{bmatrix} \right) \quad (9)$$

如式 (9) 所示为平衡正序控制得到的电流参考值,计算过程需得到电网侧电压的正序分量,文中采用陷波器技术对正序电压进行提取。将提取出来的电网侧电压正序分量代入式 (9) 得到电流内环的正序参考值,因负序分量的参考值设置为 0,即得到电流内环整体控制目标。平衡正序控制见图 5。

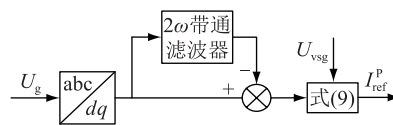


图 5 平衡正序控制

Fig.5 Balance control of the positive sequence

平衡正序控制可以得到正序电流的参考值,实现了参考电压到电流的转换,使得 VSG 在保持电压源特性的前提下,仍能对输出电流精确控制。和上文提到的 PIR 控制相结合,即可实现 VSG 并网运行时对不平衡电流的抑制。

3 基于虚拟功率的 VSG 并网预同步控制

孤岛运行时,由于 VSG 具有下垂特性,其输出电压和电网电压会出现明显的相位差,如果不加以控制,会在并网瞬间产生过大的冲击。因此, VSG 孤岛转并网模式之前需要预同步过程。

常规逆变器并网预同步过程采用电压定向控制策略,通过锁相环锁住电网侧的电压相位。文中为了避免锁相环的使用,提出一种基于虚拟功率的 VSG 并网预同步控制策略,如图 6 所示。

VSG 运行在孤岛模式时,并网开关断开,左侧是 VSG 输出电压 U_{vsg} ,如式 (10) 所示, V_1 为有效值, φ_1 为初相位;右侧是电网侧电压 U_g ,分解成正序分量和负序分量的形式,如式 (11) 所示, V_2, V_2^- 分别为正序分量和负序分量的有效值; φ_2, φ_2^- 分别为正序分量和负序分量的初相位。

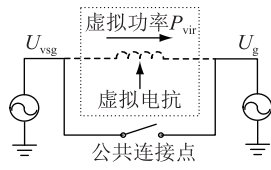


图6 基于虚拟功率预同步控制策略

Fig.6 Pre-synchronization control strategy based on virtual power

$$\begin{cases} U_a = \sqrt{2} V_1 \sin(\omega t + \varphi_1) \\ U_b = \sqrt{2} V_1 \sin(\omega t + \varphi_1 - 2\pi/3) \\ U_c = \sqrt{2} V_1 \sin(\omega t + \varphi_1 + 2\pi/3) \end{cases} \quad (10)$$

$$\begin{cases} U_{ga} = \sqrt{2} V_2 \sin(\omega t + \varphi_2) + \\ \quad \sqrt{2} V_2^- \sin(\omega t + \varphi_2^-) \\ U_{gb} = \sqrt{2} V_2 \sin(\omega t + \varphi_2 - 2\pi/3) + \\ \quad \sqrt{2} V_2^- \sin(\omega t + \varphi_2^- + 2\pi/3) \\ U_{gc} = \sqrt{2} V_2 \sin(\omega t + \varphi_2 + 2\pi/3) + \\ \quad \sqrt{2} V_2^- \sin(\omega t + \varphi_2^- - 2\pi/3) \end{cases} \quad (11)$$

在预同步过程中并网开关断开,假设 VSG 和电网之间由一条虚拟的连接线连接,由于 VSG 与电网之间存在电压差,因此连接线上流过虚拟功率,可以通过控制流过的功率来间接控制两侧电压预同步。同时,设置连接线上的虚拟阻抗为纯电感性,以实现虚拟有功功率与无功功率的解耦。实际运行过程中,网侧电压的不平衡度较小,正序分量仍保持在标么值左右,因此 $V_1 \approx V_2 \approx V$ 。可以得到虚拟阻抗上的电流如式(12)所示,其中 Z 表示虚拟阻抗, $\varphi_i = (\varphi_1 + \varphi_2 - \pi)/2$,为电流初相位。

$$\begin{cases} I_a = \sqrt{2} \frac{2V \sin\left(\frac{\varphi_2 - \varphi_1}{2}\right)}{Z} \sin\left(\omega t + \varphi_i - \frac{\pi}{2}\right) - \\ \quad \sqrt{2} \frac{V_2^-}{Z} \sin\left(\omega t + \varphi_2^- - \frac{\pi}{2}\right) \\ I_b = \sqrt{2} \frac{2V \sin\left(\frac{\varphi_2 - \varphi_1}{2}\right)}{Z} \sin\left(\omega t + \varphi_i - \frac{\pi}{2} - \frac{2\pi}{3}\right) - \\ \quad \sqrt{2} \frac{V_2^-}{Z} \sin\left(\omega t + \varphi_2^- - \frac{\pi}{2} + \frac{2\pi}{3}\right) \\ I_c = \sqrt{2} \frac{2V \sin\left(\frac{\varphi_2 - \varphi_1}{2}\right)}{Z} \sin\left(\omega t + \varphi_i - \frac{\pi}{2} + \frac{2\pi}{3}\right) - \\ \quad \sqrt{2} \frac{V_2^-}{Z} \sin\left(\omega t + \varphi_2^- - \frac{\pi}{2} - \frac{2\pi}{3}\right) \end{cases} \quad (12)$$

结合式(5)、(10)、(11)、(12)可得:

$$\begin{cases} \bar{p} = \frac{3V^2}{Z} \sin(\varphi_1 - \varphi_2) \\ \tilde{p} = \frac{3VV_2^-}{Z} \sin(2\omega t + \varphi_1 + \varphi_2) \end{cases} \quad (13)$$

由式(13)可知,虚拟有功功率的平均分量和并网两侧电压的相位差相关,可以通过控制 \bar{p} 为零从而间接实现相位的预同步。因此基于虚拟功率的分布式电源并网预同步控制策略,不需要锁相环,在不平衡度较低的系统中仍能可靠并网。具体的控制策略如图7所示。

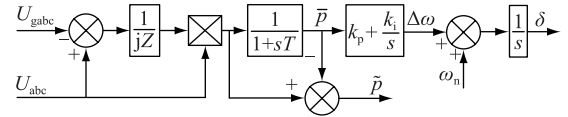


图7 基于虚拟功率的预同步控制

Fig.7 Control of pre-synchronization based on virtual power

值得注意的是,当电网侧的电压不平衡度过大,无论逆变器侧正序电压相位如何调整,并网瞬间负序电压分量均会产生过大的冲击损害并网设备。不平衡度计算如下:

$$\zeta = \frac{V_2^-}{V} = \frac{3VV_2^-/Z}{3V^2/Z} = \frac{A(\tilde{p})}{3V^2/Z} \quad (14)$$

式中: ζ 为不平衡度; $A(\tilde{p})$ 为虚拟有功功率振荡分量的幅值。

因此,通过虚拟功率的计算也能间接得到电网侧电压的不平衡度。根据 GB/T15543—2008 电能质量三相电压不平衡规定,当检测到 ζ 大于 4% 时,表示电网处于不正常运行状态,此时选择闭锁并网指令,不允许 VSG 并网。

4 硬件在环仿真验证

为了验证上文中控制策略的有效性,文中搭建了基于 RT-LAB 的控制器硬件在环的仿真平台,算例的拓扑结构以及总体控制策略如图8所示,以 TMS320F28377 型 DSP 为控制器实现所提控制策略。具体参数如表1所示。

表1 硬件在环仿真参数

Table 1 Experimental parameter of HIL

参数	数值	参数	数值
直流电压/V	800	线路电阻/ Ω	0.03
滤波电感/mH	2.5	开关频率/kHz	6
滤波电容/ μ F	100	阻尼系数 D	159
虚拟电抗/ Ω	1 000	惯量系数 J	0.2
线路电感/mH	0.54		

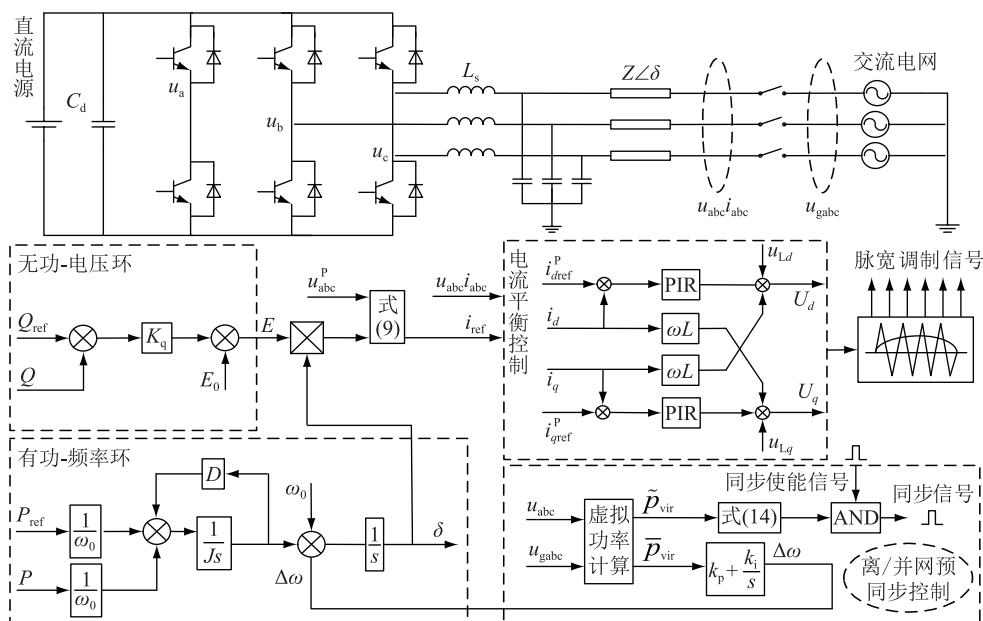


图8 不平衡电网电压下VSG控制策略

Fig.8 Control strategy of VSG under unbalanced grid voltage

4.1 不平衡电网电压下运行

并网时设置 ζ 为 13%，电网侧电压波形如图 9 所示。有功设为 20 kW，无功设为 10 kvar。如图 10 所示在传统 VSG 控制下电流畸变高达 34.13%，这是由于没有采用平衡正序控制，在负序分量影响之下，内环电流参考值叠加了大量的 2 倍工频波动分量，根据反馈控制原理，控制系统对给定不具备抗扰性能，因此无法达到控制效果；如图 11 所示，文中提出的基于 PIR 电流内环和平衡正序控制，很好地抑制了负序电流分量，输出电流畸变率低至 2.44%，基本保持三相平衡。硬件在环仿真结果表明改进后的 VSG 控制策略在不平衡工况下能控制 VSG 稳定运行，和传统 VSG 控制策略相比自适应性和鲁棒性明显提高。

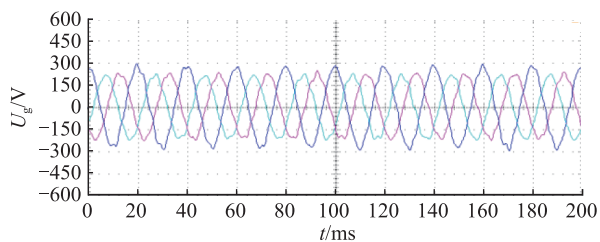


图9 电网侧电压波形 ($\zeta=13\%$)

Fig.9 Simulink waveforms of grid voltage ($\zeta=13\%$)

4.2 基于虚拟功率的并网模式切换运行

4.2.1 电网三相电压平衡

图 12 所示为 VSG 发出的有功及无功功率， $t=0$ s 时 VSG 孤岛启动， $t=0.5$ s 时发出并网信号，并网预同步控制启动， $t=0.92$ s 时 VSG 切换为并网运行

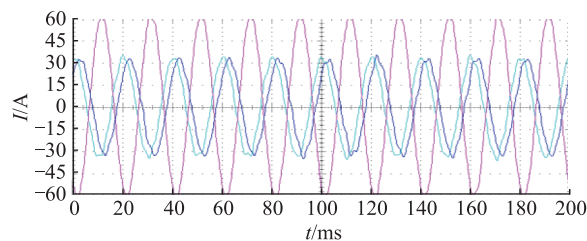


图10 传统VSG控制的电流波形

Fig.10 Simulink waveforms of grid-connected current based on traditional VSG control

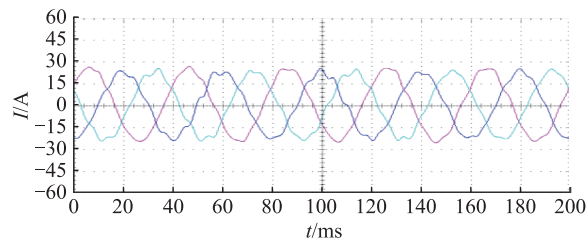


图11 基于PIR+平衡正序控制的电流波形

Fig.11 Simulink waveforms of grid-connected current based on PIR and Balance control of the positive sequence

模式， $t=3$ s 时发出离网信号，直接断开并网开关即可实现并离网的无缝切换。如图所示，VSG 在整个过程中稳定运行，模式切换瞬间能够平滑过渡。图 13 是 VSG 离并网的预同步过程，如图所示在 0.5 s 内即可完成并网点两侧电压同步。同时，虚拟有功功率逐渐减小为 0，验证了基于虚拟功率预同步控制策略的有效性。

4.2.2 电网电压小幅不平衡

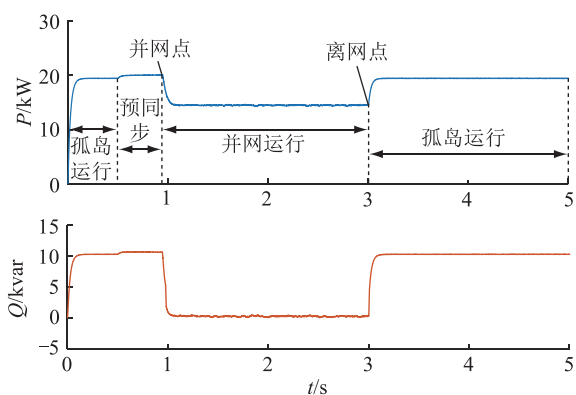


图 12 有功无功功率(电网电压三相平衡)

Fig.12 Waveforms of active and reactive power (under balanced grid voltage)

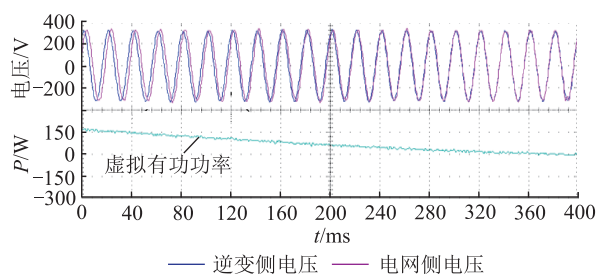
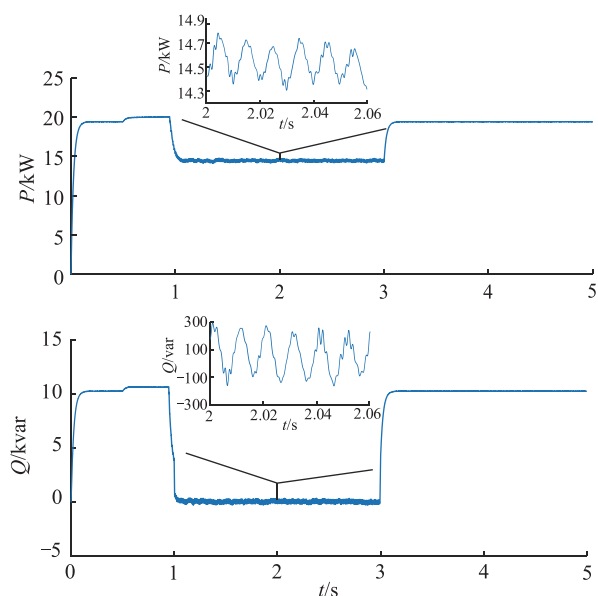


图 13 并网预同步过程

Fig.13 Waveforms of pre-synchronization

硬件在环仿真结果如图 14 所示,设置网测电压的 ζ 为 2.6%。由图 14 可以看出,在平衡电流控制策略下,逆变器并网运行时有功无功仍有小幅波动,但功率平均值和设定值吻合, VSG 仍能稳定运行。

图 14 有功无功功率($\zeta=2.6\%$)Fig.14 Waveforms of active and reactive power ($\zeta=2.6\%$)

5 结论

文中提出一种 VSG 运行在不平衡电网电压下的无锁相环控制框架,给出 VSG 利用 PIR 内环实现电流平衡控制的目标,构造虚拟功率实现 VSG 预同步过程,最终通过硬件在环仿真验证得到如下结论:

(1) 基于 PIR 电流内环的改进 VSG 控制策略和传统 VSG 控制相比能有效降低电流的畸变度,在电网电压三相平衡或者不平衡状态下均能使 VSG 稳定运行,具有较强的鲁棒性。

(2) 基于虚拟功率的 VSG 离并网预同步控制策略能够保证 VSG 离并网模式的平滑切换。在电网电压小幅度不平衡的工况下仍然能稳定地进行模式切换运行。

(3) 文中提出的 VSG 控制策略不依赖于锁相环。VSG 参考相位不直接由电网电压锁相得到,而是通过有功-频率控制环计算所得,最大化地减小了电网电压畸变对逆变器输出相位的影响,并且在简化控制系统的前提下仍然能稳定有效地运行。

参考文献:

- [1] BLAABJERG F, TEODORESCU R, LISERRE M, et al. Overview of control and grid synchronization for distributed power generation systems[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2006, 53(5):1398-1409.
- [2] 薛晨,黎灿兵,曹一家,等. 智能电网中的电网友好技术概述及展望[J]. 电力系统自动化,2011,35(15):102-107.
XUE Chen, LI Canbing, CAO Yijia, et al. An overview and prospects of grid friendly technology in smart grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(15): 102-107.
- [3] ZHONG Q C, WEISS G. Synchronverters: inverters that mimic synchronous generators[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58(4):1259-1267.
- [4] 何光辉,张仰飞,陈光宇,等. 基于虚拟同步电机的负荷换流器建模及参数设计[J]. 电力工程技术, 2018, 37(1): 79-85, 108.
HE Guanghui, ZHANG Yangfei, CHEN Guangyu, et al. Modeling and parameter design of load converter based on virtual synchronous motor[J]. Electric Power Engineering Technology, 2018, 37(1): 79-85, 108.
- [5] HIRASE Y, SUGIMOTO K, SAKIMOTO K, et al. Analysis of resonance in microgrids and effects of system frequency stabilization using a virtual synchronous generator[J]. IEEE Journal of Emerging & Selected Topics in Power Electronics, 2016, 4(4):1287-1298.
- [6] 王逸超,欧名勇,陈燕东,等. 不平衡电压下并网逆变器的功率波动抑制与电流平衡协调控制方法[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(23):6981-6987, 7089.
WANG Yichao, OU Mingyong, CHEN Yandong, et al. Coordinate control of power fluctuation suppression and current bal-

- ce under unbalanced voltage conditions[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(23):6981-6987,7089.
- [7] 郭小强, 张学, 卢志刚, 等. 不平衡电网电压下光伏并网逆变器功率/电流质量协调控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(3):346-353.
- GUO Xiaoqiang, ZHANG Xue, LU Zhigang, et al. Coordinate control of power and current quality for grid-connected PV inverters under unbalanced grid voltage[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(3):346-353.
- [8] 万晓凤, 胡海林, 聂晓艺, 等. 电网电压不平衡时的改进虚拟同步机控制策略[J]. 电网技术, 2017, 41(11):3573-3581.
- WAN Xiaofeng, HU Hailin, NIE Xiaoyi, et al. An improved control strategy for virtual synchronous generator under unbalanced grid voltage[J]. Power System Technology, 2017, 41(11):3573-3581.
- [9] 顾彬仕, 王建华, 骆芳芳, 等. 三相四桥臂虚拟同步发电机预同步、多环路控制及负载不平衡控制方法[J]. 电工技术学报, 2017, 32(S1):138-150.
- GU Binshi, WANG Jianhua, LUO Fangfang, et al. A pre-synchronization, multiple loops control, and unbalanced load control strategies for three-phase four-leg virtual synchronous generator[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(S1):138-150.
- [10] AHN S C, HYUN D S. New control scheme of three-phase PWM AC/DC converter without phase angle detection under the unbalanced input voltage conditions[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2002, 17(5):616-622.
- [11] 雷芸, 肖岚, 郑昕昕. 不平衡电网下无锁相环三相并网逆变器控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(18):4744-4752.
- LEI Yun, XIAO Lan, ZHENG Xinxin. Control strategies of three-phase grid-connected inverters without phase-lock loop under unbalanced grids[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(18):4744-4752.
- [12] DONG D, WEN B, BOROYEVICH D, et al. Analysis of phase-locked loop low-frequency stability in three-phase grid-connected power converters considering impedance interactions[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(1):310-321.
- [13] ZHONG Q C, NGUYEN P L, MA Z, et al. Self-synchronized synchronverters: inverters without a dedicated synchronization unit[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 29(2):617-630.
- [14] 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(16):2591-2603.
- LYU Zhipeng, SHENG Wanxing, ZHONG Qingchang, et al. Virtual synchronous generator and its applications in micro-grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2014(16):2591-2603.
- [15] 赤木泰文, 埃德森, 毛立赛. 瞬时功率理论及其在电力调节中的应用[M]. 北京:机械工业出版社, 2009:16-33.
- AKAGI H, WATANABE E H, AREDES M. Instantaneous power theory and applications to power conditioning[M]. Beijing:China Machine Press, 2009:16-33.
- [16] YE Y, KAZERANI M, QUINTANA V H. A novel modeling and control method for three-phase PWM converters[C]// IEEE Power Electronics Specialists Conference. Vancouver, BC: IEEE, 2001:102-107.

作者简介:



奚鑫泽

奚鑫泽(1988),男,博士,高级工程师,从事新能源并网技术与系统分析相关工作(E-mail: cs_xxz@163.com);

徐志(1984),男,硕士,高级工程师,从事电能质量与电磁暂态仿真技术相关工作;

洪灏灏(1994),男,硕士在读,研究方向为分布式电源并网控制。

Control strategies of grid-connection and operation based on virtual synchronous generator without phase-lock loop under unbalanced grids

XI Xinze^{1,2}, XU Zhi¹, HONG Haohao³, GU Wei³

(1. Electric Power Research Institute of Yunnan Power Grid Co., Ltd., Kunming 650217, China;

2. School of Electrical Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China;

3. School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China;)

Abstract: In order to solve the problem of the current distortion under unbalanced voltage and the complexity of the phase-locked loop (PLL) of the grid-connected inverter, a strategy based on virtual synchronous generator (VSG) under unbalanced grid voltage without PLL is proposed. The control method of VSG under unbalanced grid voltage is detailed studied. An improved VSG control strategy based on PIR current control loop is designed to restrain current distortion effectively without changing output characteristics. Meanwhile, a VSG resynchronization control strategy based on virtual power is proposed to guarantee seamless switches between grid-connection mode and off-grid mode. The PLL is not used throughout the proposed strategy, which avoids the bad effect of PLL on control precision and response speed and makes the control system simplified in addition. Finally, a real-time simulation platform based on RT-LAB is built to verify the proposed control strategy.

Keywords: VSG; unbalanced grid voltage; seamless switching; without PLL; RT-LAB

(编辑 方晶)