

# 基于 PLL 的 VSG 并网控制研究

杨 洋,丁树业,徐峥嵘,杨 旭,王 顺

(南京师范大学南瑞电气与自动化工程学院,江苏 南京 210023)

**[摘要]** 新能源通过电力电子接口接入电网也为电网的稳定运行带来了新的挑战,逆变器由离网模式切换到并网运行模式的瞬间容易产生较大的冲击电流. 现提出一种基于锁相环虚拟同步发电机的预同步并网控制技术能够有效解决这一问题. 该控制策略下的逆变器能够平滑并网、电压相位的同步追踪有效抑制了冲击电流、实现离并网的快速切换,同时改善了并网逆变器的性能、增强了电网的稳定性. 最后,通过搭建并网虚拟同步发电机模型验证了该设计的正确性和有效性.

**[关键词]** 虚拟同步发电机,锁相环,预同步

**[中图分类号]** TM761 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1672-1292(2020)01-0020-05

## Research on Grid-Connected Control of VSG Based on PLL

Yang Yang, Ding Shuye, Xu Zhengrong, Yang Xu, Wang Shun

(School of NARI Electrical and Automation, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China)

**Abstract:** The access of new energy to power grid through power electronic interface also brings new challenges to the stable operation of power grid. The inverter has a large impact current at the moment when it is switched from the off-grid mode to the grid-connected mode. This paper presents a pre-synchronous grid-connected control technology of Virtual Synchronous Generator based on Phase Locked Loop, which can effectively solve this problem and quickly enter the grid-connected operation. The inverter under this control strategy can achieve a smooth grid-connected mode, synchronously track the phase of voltage, effectively suppress a large impact current, fastly realize switching from the off-grid mode to the grid-connected mode. Meanwhile, it has improved the performance of inverter in the grid-connected mode, and enhanced the stability of the power grid. Finally, the grid-connected Virtual Synchronous Generator model is built to verify the correctness and effectiveness of the design.

**Key words:** Virtual Synchronous Generator, Phase Locked Loop, pre-synchronous

与分布式电源相比,传统的同步发电机本身固有旋转惯量和阻尼分量,因此能为电网提供必要的电压和频率支撑,具备良好的电网接入特性,这是当前常见的分布式逆变电源控制策略如基于旋转坐标系解耦的电流型控制策略和下垂控制策略<sup>[1-2]</sup>等所无法比拟的. 随着近几年的研究,一些学者提出了基于虚拟同步发电机(Virtual Synchronous Generator, VSG)的并网逆变器控制策略<sup>[3-5]</sup>,其基本思想是使逆变器模拟同步发电机的运行特性,达到为电网提供惯性和阻尼支撑的目的,有效改善了系统稳定性<sup>[6-7]</sup>.

VSG 从离网运行模式切换到并网运行模式时,为了防止 VSG 输出电压幅值和频率与电网电压相差较大而产生并网冲击,需要采用某种技术使得 VSG 输出电压在并网开关闭合前就要和电网电压保持同步,这种技术叫做预同步技术<sup>[8-10]</sup>. 本文提出了基于锁相环(Phase Locked Loop, PLL)的并网控制方法,实现 VSG 与电网的同步追踪.

## 1 虚拟同步机控制策略

如图 1 所示,本文选用电压源型三相全桥拓扑作为 VSG 的载体,储能采用理想直流源替代. 从左到右依次为直流电压源、直流支撑电容、逆变器、LC 滤波器、PCC 并网点处的开关及电网. 逆变器将直流电压逆变成

收稿日期:2019-04-12.

基金项目:国家自然科学基金项目(51977112)、江苏省自然科学基金项目(BK20191370).

通讯作者:丁树业,博士,教授,研究方向:电机内综合物理场数值分析及新型电机理论研究. E-mail:dingshuye@163.com

交流量,LC 滤波器可以滤除开关频率附近的高次谐波. PCC 为微网与大电网的公共连接点,通过闭合 PCC 点处开关,逆变器可以实现并网运行模式;打开开关时,逆变器“自给自足”,形成孤岛运行模式.

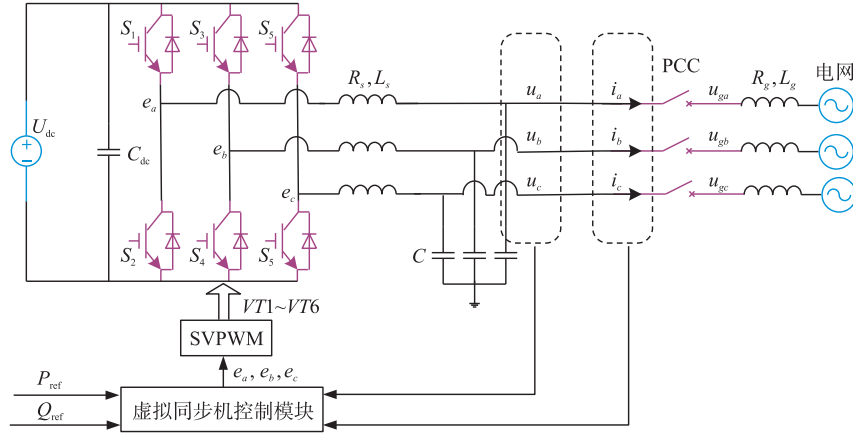


图 1 虚拟同步控制系统

Fig. 1 Virtual synchronous control system

图 1 中  $V_{dc}$  为逆变器直流侧电压;  $C_{dc}$  为直流支撑电容;  $e_a, e_b, e_c$  为经 SPWM 生成的电压;  $L_s$  为滤波电感,  $C$  为滤波电容,  $R_s$  为开关器件、滤波电感和线路的等效串联阻抗, 不考虑滤波电容对等效串联电阻的影响.  $U_a, U_b, U_c$  为经滤波之后的变流器输出端电压;  $i_a, i_b, i_c$  为逆变器输出电流;  $U_{ga}, U_{gb}, U_{gc}$  为电网侧三相电压; PCC 点为大电网与逆变器之间的公共节点.  $P_{ref}, Q_{ref}$  表示并网逆变器输入参考有功功率和无功功率. 虚拟同步机控制模块得到并网逆变器交流侧电压, 再经过正弦脉宽调制 SPWM 产生脉冲来驱动 IGBT 的通断.

传统同步发电机的惯性响应和阻尼主要体现在其转子运动方程上, 其中有功功率和频率紧密联系, 在系统发生变动时可以抑制各时域响应的剧烈波动.

模拟同步机, 可以建立虚拟同步机的转子运动特性方程如下:

$$J \frac{d\omega}{dt} = T_m - T_e - T_d = T_m - T_e - D(\omega - \omega_0). \quad (1)$$

定子电压方程:

$$E = U + IR_A + jIX_s. \quad (2)$$

式中,  $J$  代表同步发电机的转动惯量;  $\omega$  代表其电气角速度;  $\omega_0$  代表电网同步角速度;  $T_m, T_e$  和  $T_d$  分别代表同步发电机的机械、电磁和阻尼转矩;  $D$  是阻尼系数;  $E$  代表励磁电动势;  $U$  代表电枢端电压;  $I$  代表电枢电流;  $R_A$  代表电枢电阻;  $X_s$  代表同步电抗.

借鉴同步发电机传统调速器的原理为原则设计 VSG 虚拟调速器, 得到虚拟调速器中的虚拟机械转矩  $T_m$ , 表达式为:

$$T_m = T_0 + \Delta T = P_{ref} / \omega - k_f(f - f_0). \quad (3)$$

式中,  $T_0$  为给定的机械转矩;  $\Delta T$  为频率变化对机械转矩的影响值;  $P_{ref}$  为逆变器的参考功率指令值;  $k_f$  为频率调节系数.

模拟同步机的一次调频特性, 基于下垂控制求取电压参考值, 模型如下:

$$U_{ref} = U_N + k_q(Q_{ref} - Q). \quad (4)$$

式中,  $U_{ref}$  为并网电压的幅值指令值;  $U_N$  为系统额定电压幅值;  $Q_{ref}, Q$  分别为逆变器的参考无功输入和实际无功输出;  $k_q$  为无功下垂控制系数.

## 2 并网预同步控制策略

借鉴同步机的并网控制方法, 并结合电力电子器件的灵活性和快速性的特点, 设计 VSG 的并网控制方法. 离网运行时 VSG 机端电压  $u_a$  和电网电压  $u_{ga}$  分别为

$$u_{ga} = U_g \sin(\omega_0 t + \theta_1), \quad (5)$$

$$u_a = U \sin(\omega t + \theta_2). \quad (6)$$

一般情况下,VSG 离网运行时的电压幅值  $U$  和电网电压幅值  $U_g$  相差不大,都等于  $U$ 。那么,两者的电压瞬时差值为:

$$\Delta u = u_{g^a} - u_a = U_g \sin(\omega_0 t + \theta_1) - U \sin(\omega t + \theta_2) \approx 2U \sin\left(\frac{\omega_0 t - \omega t}{2} + \frac{\theta_1 - \theta_2}{2}\right) \cdot \cos\left(\frac{\omega_0 t + \omega t}{2} + \frac{\theta_1 + \theta_2}{2}\right). \quad (7)$$

通过上式可知,离网运行时 VSG 与电网的最大瞬时幅值差为  $2U$ . VSG 投入并网运行模式时,会产生大的并网冲击电流,甚至导致电压波形畸变,影响电能质量. 下面设计了 VSG 的并网控制方法.

要达到 VSG 与电网电压同步,首先通过 PLL 获得 VSG 和电网电压的频率、幅值、相位进行控制。如图 2 所示的矢量图模型,以电压矢量  $\mathbf{U}_g$  为  $d$  轴(电网电压三相平衡时, $q$  轴分量为 0, $d$  轴分量等于幅值), $d$  轴与  $\alpha$  轴夹角为  $\theta_g$ , $\mathbf{U}_g$  和  $\mathbf{U}$  之间相位差为  $\Delta\theta$ 。VSG 电压矢量以角速度  $\omega$  旋转,电网电压矢量以角速度  $\omega_0$  旋转,如果使得两者重合,则实现并网的无缝切换。控制 VSG 相位和电网一致,只要令  $u_\alpha$  为 0, $u_\beta$  为电网电压的幅值,实现两者的同步追踪。

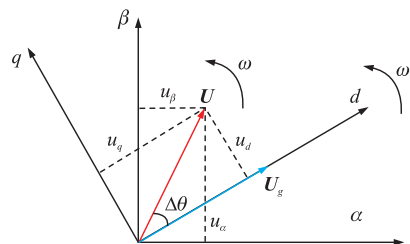


图 2 并网同步电压向量图

基于以上分析,并网时,控制器实时检测 PCC 两侧电压差,当  $\Delta u$  的有效值小于阈值约为 30 V,说明并网开关电压差足够小,实现了与电网电压的同步。

基于 PLL 的 VSG 同步控制原理图如图 3 所示,利用三相 PLL 获得电网的相位、幅值、频率,对电网电压幅值同步量  $\Delta U$  和相位同步量  $\Delta \omega$  控制为 0,实现与电网的同步,可以并网。

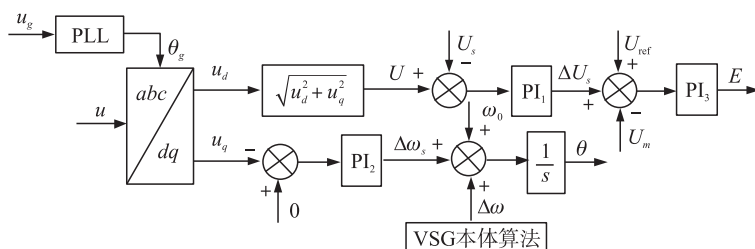


图3 并网同步控制框图

**Fig. 3 Synchronous control strategy of the VSG in grid-tied mode**

### 3 实验仿真验证

为了验证本文所提的预同步并网控制策略,通过 Matlab/Simulink 仿真软件搭建如图 4 所示的单机模型图并进行预同步并网仿真分析.选取的系统参数如表 1 所示.

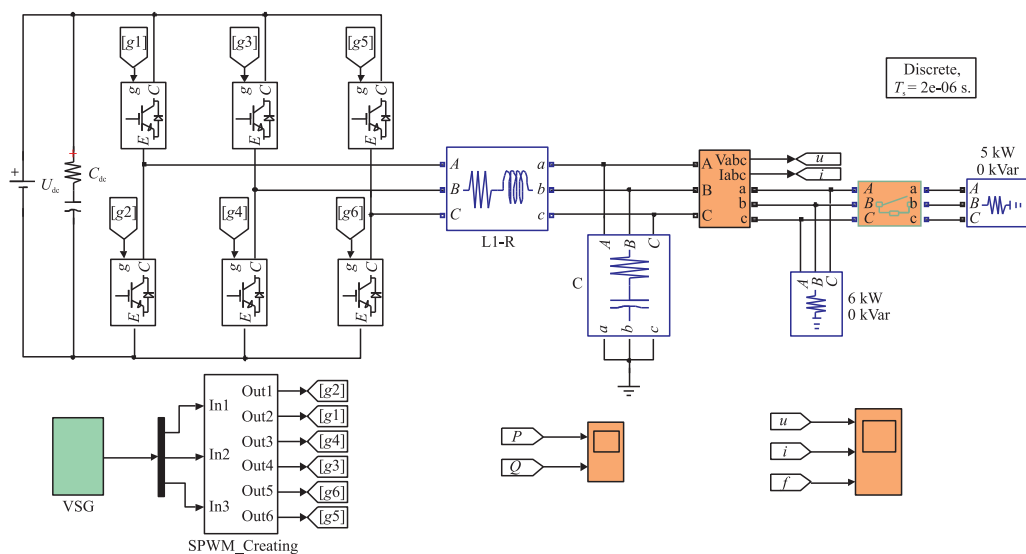


图 4 VSG 仿真模型

**Fig. 4 VSG simulation model**

在 VSG 模型的上加入预同步控制策略,能够实现 VSG 平滑并网. 取 VSG 的输出电压和电网的相位,经锁相环控制,使得  $q$  轴分量为 0,  $d$  轴分量为电网的幅值(电网的  $q$  轴分量为 0,  $d$  轴分量为它的幅值),这样就实现了预同步控制. 如图 5 所示,  $\omega t_1$  代表电网的相位,  $\omega t_2$  代表 VSG 的相位, 0.1 s 开启预同步, 0.2 s 基本上实现了相位的同步追踪.

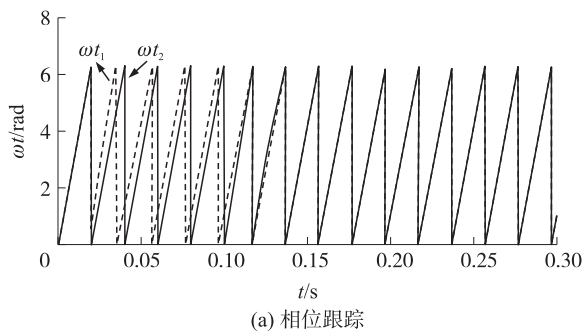


表 1 实时仿真参数设置			
Table 1 Real-time simulation parameters			
系统参数	数值	系统参数	数值
直流侧电压 $U_{dc}/V$	800	无功功率指令值 $Q_{ref}/Var$	0
电网相电压有效值 $U_g/V$	220	滤波电感 $L_f/mH$	8
电网频率 $f_0/Hz$	50	有功功率指令值 $P_{ref}/kW$	6
开关频率 $f_c/kHz$	20	滤波电容 $C/\mu F$	3

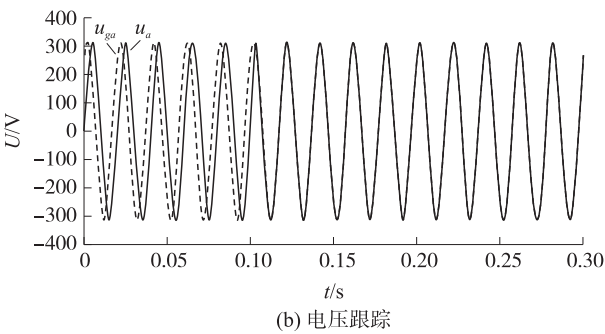


图 5 预同步波形  
Fig. 5 Pre-synchronous waveform

当达到并网要求时,闭合并网开关 PCC. VSG 并网运行时,它的电压受到电网的钳位作用,能实现幅值和相位的同步,如图 6 所示,并网电压、电流的正弦度高、谐波畸变率低,  $THD = 1.3\%$ , 符合电能质量要求;  $THD < 5\%$ , 满足设计的要求.

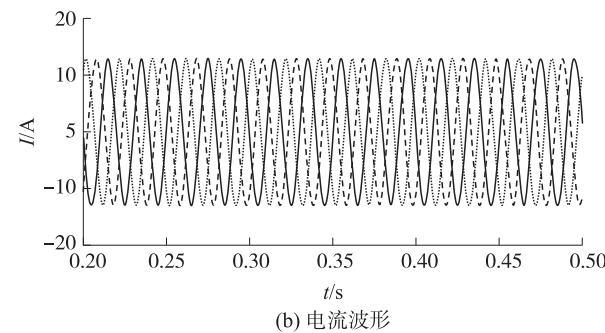
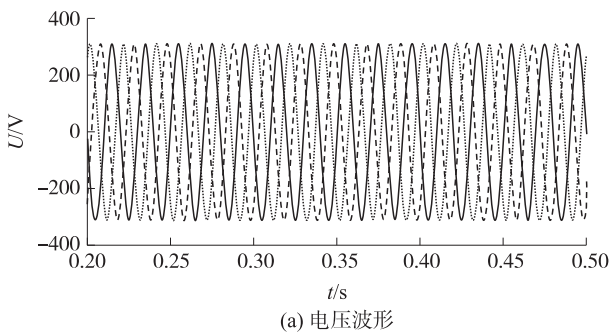


图 6 并网电压、电流波形

Fig. 6 Voltage and current waveforms of the VSG in grid-tied mode

0.5 s 闭合开关, 并入负载  $P_2 = 5\text{ kW}$ , 仿真波形如图 7 所示. 在负载突变的情况下, 输出的电压始终恒定, 不受负载突变的影响, 系统的稳定性好. 如图 8 所示, 并网功率能够对指令功率有效地追踪.

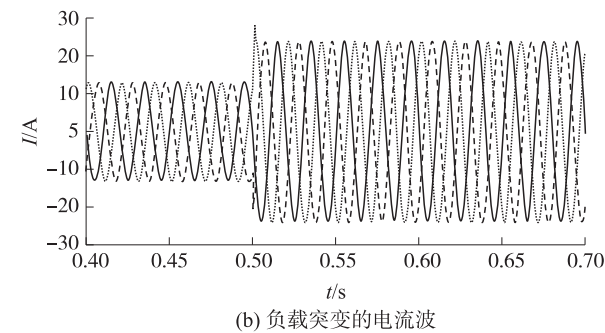
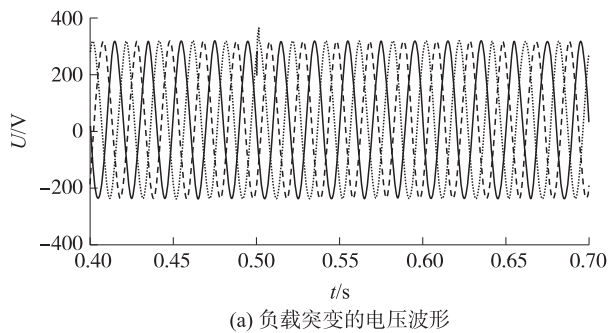


图 7 负载突变时的电压和电流波形

Fig. 7 Voltage and current waveforms during the sudden change of the load

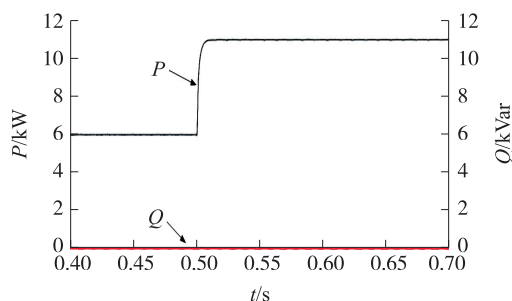


图 8 负载突变时的功率波形

Fig. 8 Power waveforms during the sudden change of the load

## 4 结论

本文在 Matlab/Simulink 平台上搭建了 VSG 并网仿真模型. 在 VSG 控制基础上加入预同步控制策略, 保证了基于该控制策略下的逆变器不仅能与电网电压同步追踪, 而且有效抑制了并网时的冲击电流. 通过仿真结果表明: 该控制策略能够实现离并网模式的无缝切换, 快速平滑地并网, 且能够快速进入稳态, 能达到预期的设计标准, 验证了本文所设计的预同步控制策略的正确性.

### [参考文献] (References)

- [1] 吴云亚, 阚加荣, 谢少军. 基于双 d-q 坐标系的并网逆变器控制策略[J]. 电工技术学报, 2011, 26(8): 106-112.
- [2] 顾和荣, 赵巍, 王雷, 等. 微电网逆变器电流下垂控制分析与实验研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(18): 45-48.
- [3] 郑天文, 陈来军, 陈天一, 等. 虚拟同步发电机技术及展望[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(21): 165-175.
- [4] GAO F, 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.
- [5] BEVRANI H, ISE T, MIURA Y. Virtual synchronous generators a survey and new perspectives[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2014, 54(1): 244-254.
- [6] 管敏渊, 张浩, 楼平, 等. 柔性直流输电换流站的同步电机模拟特性分析[J]. 电网技术, 2016, 40(6): 1743-1750.
- [7] 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.
- [8] 王克. 基于虚拟同步发电机的风力发电系统接口特性的研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2015.
- [9] 郑志萍, 刘阳, 杨武盖. 模式转换下分布式电源接入微电网的控制策略研究及仿真[J]. 电测与仪表, 2015, 52(17): 73-78.
- [10] 张纯, 陈民铀, 王振存. 微网运行模式平滑切换的控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(20): 1-5.

[责任编辑: 陈 庆]