

# 基于虚拟同步发电机的无锁相环预同步并网控制策略

张宇辰, 张丽霞, 马文忠

[ 中国石油大学(华东)新能源学院, 山东 青岛 266580 ]

**摘要:** 利用虚拟同步发电机(VSG)技术, 针对微电网逆变器离/并网平滑切换控制策略进行研究。首先, 建立 VSG 数学模型, 对 VSG 功频调节器、励磁调节器和电磁方程等控制部分进行设计, 并给出相应的控制框图。其次, 对传统离/并网切换原理进行分析, 锁相环(PLL)的存在, 导致在很大程度上影响预同步速度和精度, 针对此问题提出一种改进预同步控制方法, 省去 PLL 环节且只需要 2 个 PI 调节器, 控制参数减少, 切换瞬间冲击电流减小且能够抑制有功、无功功率冲击, 有效实现微电网逆变器离/并网平滑切换。最后, 通过基于 MATLAB/Simulink 的仿真结果验证了所提出控制策略的正确性和优越性。

**关键词:** 虚拟同步发电机; 微电网; 预同步; 并网逆变器; 平滑切换

中图分类号: TM 341 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2020)11-0082-09

doi: 10.12177/emca.2020.124

## Pre-Synchronization Grid-Connected Control Strategy Without PLL Based on Virtual Synchronous Generator

ZHANG Yuchen, ZHANG Lixia, MA Wenzhong

(College of New Energy, China University of Petroleum, Qingdao 266580, China)

**Abstract:** Based on the virtual synchronous generator (VSG) technology, the off/on grid smooth switching control strategy of microgrid inverter is studied. Firstly, the mathematical model of VSG is established, and the control parts of VSG including power frequency regulator, excitation regulator and electromagnetic equation are designed. Secondly, the traditional off/on grid switching principle is analyzed. Due to the existence of phase-locked loop (PLL), the pre-synchronization speed and accuracy are greatly affected. Aiming at this problem, an improved pre-synchronization control method is proposed, which can replace the PLL section with only two PI regulators. Thus the number of control parameters is reduced, the switching instantaneous impulse current is small, and the active and reactive power impact is suppressed, resulting in the off/on grid smooth switching of microgrid inverter. Finally, the simulation results of MATLAB/Simulink verify the correctness and superiority of the proposed control strategy.

**Key words:** virtual synchronous generator (VSG); microgrid; pre-synchronization; grid-connected inverter; smooth switching

### 0 引言

随着能源危机和环境问题在全球范围内日益

突出, 分布式发电技术和微电网技术也因此得到广泛关注。一般而言, 分布式电源主要通过并网逆变器接入电网, 与传统同步发电机相比, 其虽具

收稿日期: 2020-07-04; 收到修改稿日期: 2020-08-14

作者简介: 张宇辰(1995—), 男, 硕士研究生, 研究方向为微电网逆变器虚拟同步发电机技术。

张丽霞(1978—), 女, 博士, 副教授, 研究方向为柔性电力技术在电力系统中的应用。

马文忠(1968—), 男, 博士, 教授, 研究方向为电力电子技术与智能电网技术等。

有控制灵活、响应速度快等优点,但也存在缺少惯性和阻尼、过载能力差、难以参与电网调节等缺点,对电力系统的安全稳定运行造成不利影响<sup>[1-2]</sup>。

借鉴传统电力系统运行经验,若控制并网逆变器使其具有同步发电机外特性,必然有利于分布式发电系统和微电网的稳定运行,同时可将一些传统电力系统运行控制策略与理论分析方法有效引入到微电网中<sup>[3]</sup>。基于该思想,国内外学者提出了虚拟同步发电机(VSG)控制方法,该控制方法具有同步发电机外特性,为微电网提供必要的惯性和阻尼作用,提高微电网运行稳定性<sup>[4-5]</sup>。

微电网存在并网和孤岛 2 种运行模式,如何在 2 种模式间的平滑切换是微电网目前的研究热点和难点<sup>[6]</sup>。文献[7-8]利用锁相环(PLL)获取并网开关两侧电压幅值和相位信息,将幅值差通入 PI 调节器并加到 VSG 无功-电压控制中,将相角差通入 PI 调节器并加到 VSG 有功-频率控制中,实现平滑切换。但是,由于存在 PLL,将影响预同步速度和精度。为此,文献[9]提出基于直接电压鉴相原理的预同步控制策略,实现无 PLL VSG 控制在不同运行模式之间的无缝切换。该方法虽然省去 PLL,但未考虑 VSG 三相电压不平衡运行状态,无法在三相电压不平衡状态下实现无缝切换。文献[10]提出一种 VSG 控制双馈风电机组无 PLL 预同步控制策略。通过在 VSG 外环控制中加入频率相位控制器和幅值预同步控制器,控制双馈风电机组并网前定子频率、相位和电压幅值与电网相同,并提出在无功-电压环中引入虚拟阻抗,实现双馈风电机组平滑并网。文献[11]提出一种基于虚拟功率和电压频率二次控制的预同步单元,省去 PLL 且控制简单,具有较好的有功功率和无功功率跟踪性能。文献[12]提出一种改进型控制器结构,可在模式切换前预先估算并设置调节器输出需求,有效解决并网/孤岛模式间平滑切换问题,并针对微网系统提出一种软件锁相方法,为储能变流器提供相位基准,保证系统在各种模式切换条件下母线电压相位的连续性和平顺性。文献[13]以 VSG 系统二次电压频率控制为基础,提出基于二次调频调压控制的微网系统预同步控制策略,减小并网瞬间

电流冲击,实现了微网系统孤岛/并网模式间的平滑切换。

本文在以上研究基础上,提出一种基于 VSG 控制的新型微电网逆变器平滑切换控制策略,省去 PLL,以 VSG 输出相角作为 abc/dq 坐标变换基准角,在 dq 坐标系下推导出逆变器输出电压与电网电压相角差  $\sin\Delta\theta$  ( $\Delta\theta$  很小时有  $\sin\Delta\theta \approx \Delta\theta$ ) 表达式,与零值作差后通入 PI 调节器,实现相位同步;测量公共连接点(PCC 点)两侧电压误差并送入 PI 调节器,实现幅值同步,进而实现平滑切换。另外,该控制策略的优势还在于可在电网电压不平衡、电网电压短时跌落和电网电压存在谐波等运行条件下实现 VSG 离/并网平滑切换,具有较强的适应性。该研究也为微电网运行控制提供了一条新的途径。

## 1 VSG 的设计

VSG 控制策略主要包括有功-频率控制、无功-电压控制和电磁方程控制部分<sup>[14]</sup>。下文将对以上这 3 个控制部分进行设计,并给出相应控制框图,解释逆变器能够表现出与实际同步发电机相似特性的原因。

### 1.1 有功-频率控制

为了模拟转子的旋转惯性,根据同步发电机二阶模型,VSG 有功-频率控制方程如下:

$$\begin{cases} J \frac{d\omega}{dt} = \frac{P_m}{\omega_m} - \frac{P}{\omega_m} - D(\omega - \omega_0) \\ \frac{d\delta}{dt} = \omega - \omega_0 \end{cases} \quad (1)$$

式中: $J$ 为虚拟转动惯量; $\omega$ 为电气角速度; $P_m$ 、 $P$ 分别为 VSG 机械功率和电磁功率; $\omega_m$ 为机械角速度; $D$ 为阻尼系数; $\omega_0$ 为电网同步角速度; $\delta$ 为 VSG 功角。

与传统下垂控制策略相比,VSG 存在虚拟惯性和阻尼系数,因此当有功负荷突变时,VSG 输出频率不会立即改变且频率变化范围较小,保证系统有功和频率稳定。

为了模拟同步发电机一次调频特性,需要在控制器中加入有功-频率控制环节:

$$P_m = P_n + K_\omega(\omega - \omega_0) \quad (2)$$

式中: $P_n$ 为有功功率参考值; $K_\omega$ 为有功-频率调差系数。

结合式(1)和式(2),可知 VSG 有功-频率控制原理如图 1 所示。

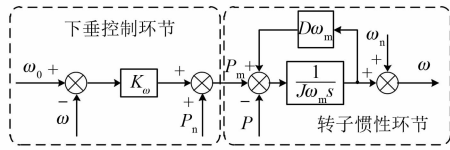


图 1 有功-频率控制框图

### 1.2 无功-电压控制

无功-电压控制环节可根据微电网中的无功负荷来实时调整 VSG 内电势大小。VSG 无功-电压控制方程如下:

$$E = E_n + n(Q - Q_n) \quad (3)$$

式中: $E$  为 VSG 内电势实际值; $E_n$  为 VSG 内电势额定值; $n$  为无功-电压下垂系数; $Q$  为输出无功功率实际值; $Q_n$  为无功功率额定值。

无功-电压控制原理如图 2 所示。由图 2 可知,当微电网中无功负荷增加时,VSG 会为微网提供无功支撑。

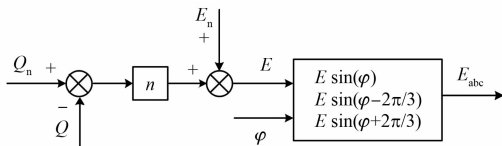


图 2 无功-电压控制框图

### 1.3 电磁方程控制

为了模拟同步发电机电磁特性,忽略同步发电机复杂电磁暂态过程,可得 VSG 电磁方程:

$$E_{abc} = R_s i_{abc} + L_s \frac{di_{abc}}{dt} + u_{abc} \quad (4)$$

式中: $E_{abc}$  为 VSG 内电势; $R_s$  为虚拟同步电阻; $i_{abc}$  为 VSG 输出电流; $L_s$  为虚拟同步电抗; $u_{abc}$  为 VSG 输出电压。

利用电磁方程可以改变虚拟阻抗大小。

电磁方程反映了 VSG 内电势与输出电压间的关系,模拟了同步发电机定子电气特性<sup>[15]</sup>。图 3 为电磁方程控制框图,其中  $i$  为输出电流, $u_{ref}$  为双闭环控制器电压参考值。

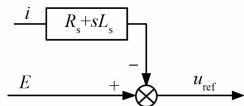


图 3 电磁方程控制框图

### 1.4 VSG 整体控制策略

图 4 为 VSG 整体控制框图,主要由有功-频率控制、无功-电压控制和电磁方程控制 3 部分组成。图 4 中,首先控制器计算 VSG 输出有功功率  $P$  和无功功率  $Q$  的大小,然后利用有功-频率控制部分和无功-电压控制部分分别获得频率  $\omega$  和内电势  $E$ ,并将其结合构成 VSG 内电势矢量  $E$ 。在电磁方程控制部分中,利用内电势  $E$  减去虚拟同步阻抗上的压降作为电压参考值  $u_{ref}$ ,稳态时双闭环控制器使 VSG 输出电压  $u$  等于电压参考值  $u_{ref}$ ,实现电磁方程控制要求。

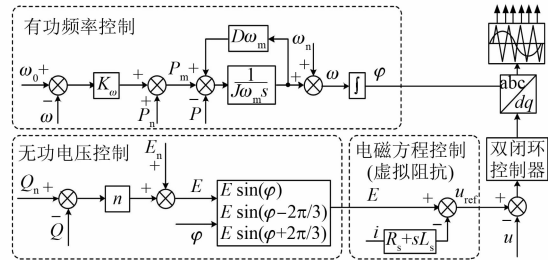


图 4 VSG 控制策略原理图

## 2 VSG 离/并网平滑切换控制策略

VSG 可以在孤岛和并网 2 种模式下运行,因此平滑切换是保证微电网逆变器不间断稳定运行的关键控制技术。本节主要对模式切换过程的电压突变进行分析,介绍并网向离网切换过程和所提出的改进预同步控制策略具体实现过程。

### 2.1 模式切换与电压突变分析

基于 VSG 控制的微电网逆变器在离网和并网 2 种模式下运行时,可能由于 PCC 点两侧频率不同,两侧相位差实时变化,同时也会由于本地负载大小不同导致 PCC 点两侧电压幅值不同。如果在 VSG 并网瞬间不加以控制,则会产生很大的电流冲击和电压波动,导致切换失败<sup>[16]</sup>。以下具体分析两侧相位差引起的电压幅值大小。

以 a 相电压为例,假设离网运行时逆变器输出电压  $u_a$  和电网侧电压  $u_{ga}$  分别为

$$\begin{cases} u_{ga} = U_1 \sin(\omega_0 t + \theta_1) \\ u_a = U_2 \sin(\omega t + \theta_2) \end{cases} \quad (5)$$

假设逆变器离网运行时电压幅值和电网电压幅值相差较小,近似有  $U_1 \approx U_2 = U$ ,则两侧电压瞬时差可表示为

$$\begin{aligned}
 u_e &= u_{ga} - u_a = \\
 &U_1 \sin(\omega_0 t + \theta_1) - U_2 \sin(\omega t + \theta_2) \approx \\
 2U \sin\left(\frac{\omega_0 - \omega}{2}t + \frac{\theta_1 - \theta_2}{2}\right) \cdot \cos\left(\frac{\omega_0 + \omega}{2}t + \frac{\theta_1 + \theta_2}{2}\right)
 \end{aligned} \quad (6)$$

由式(6)可见, PCC 点两侧电压不同步可能在切换瞬间产生最大为  $2U$  的电压差, 冲击电流很大, 造成并网失败。因此, 需要在 VSG 并网前进行预同步控制, 实现平滑切换。

## 2.2 并网向离网切换

微电网由并网向离网切换时, 如果逆变器和电网之间不存在功率交换, 即线路中不会有电流通过, 则可保证不对负荷和电网产生冲击电流<sup>[17]</sup>。由上文分析可知, VSG 模拟同步发电机外特性, 可等效为一个独立电压源。当并网开关断开后, VSG 仍然能保持并网时的状态, 可为本地负荷提供电压和频率支撑, 致使微电网在并网向离网切换过程中不会出现明显的暂态过程, 可实现平滑切换<sup>[18]</sup>。因此, 本文对 VSG 由并网向离网切换过程不做过多研究。

## 2.3 改进后预同步控制策略

逆变器输出电压与电网电压保持同步是实现离/并网平滑切换的关键。VSG 并网前, 调节其输出电压幅值、频率和相位, 使之与电网电压保持同步, 即预同步技术<sup>[19]</sup>。

传统预同步方法采用 2 个 PLL 分别对逆变器输出电压和电网电压进行锁相, 接着将 PCC 点两侧电压相位差、频率差和幅值差分别通入 PI 调节器进行调节, 运算量大且控制结构复杂, 预同步速度和精度受到 PLL 干扰<sup>[20]</sup>。针对该问题, 本文提出一种改进预同步控制方法, 省去 2 个 PLL 环节, 只需要 2 个 PI 调节器, 控制结构简单, 缩减运算量。

图 5 为逆变器输出电压与电网电压示意图。图 5 中,  $U_{od}$ 、 $U_{oq}$  分别为 VSG 输出电压  $U_o$  在  $d$  轴和  $q$  轴上的分量,  $U_{gd}$ 、 $U_{gq}$  分别为电网电压  $U_g$  在  $d$  轴和  $q$  轴上的分量。

对于 VSG 输出电压相位和频率调节, 通常情况下, 当 VSG 输出电压与电网电压相位差  $\Delta\theta$  很小时, 满足:

$$\sin\Delta\theta \approx \Delta\theta \quad (7)$$

其中:  $\Delta\theta = \theta_g - \theta_o$ 。

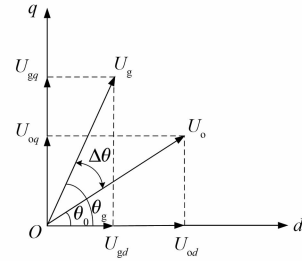


图 5 逆变器电压与电网电压示意图

根据式(7), 结合图 5, 经过计算推导, 通过  $U_{od}$ 、 $U_{oq}$  和  $U_{gd}$ 、 $U_{gq}$  可求出  $\sin\Delta\theta$  的表达式:

$$\sin\Delta\theta = \sin(\theta_g - \theta_o) = \frac{U_{gq}U_{od} - U_{gd}U_{oq}}{\sqrt{U_{od}^2 + U_{oq}^2} \times \sqrt{U_{gd}^2 + U_{gq}^2}} \quad (8)$$

通过式(8)对两侧电压相位差进行调节, 即可实现两侧电压相位同步。

对于 PCC 点两侧电压幅值差的调节, 通过测量两侧电压有效值并将两者作差后通入 PI 调节器进行无差调节, 可实现两侧电压幅值同步<sup>[21]</sup>。即在两侧电压相位同步和幅值同步的条件下可实现 VSG 离/并网平滑切换。

具体计算过程: 以 VSG 输出相角作为 abc/dq 坐标变换基准角, 将 VSG 输出电压进行 abc/dq 变换, 得到输出电压  $U_o$ 。在  $d$  轴和  $q$  轴上的分量  $U_{od}$  和  $U_{oq}$ , 同时将电网电压进行 abc/dq 变换, 得到电网电压  $U_g$  在  $d$  轴和  $q$  轴上的分量  $U_{gd}$  和  $U_{gq}$ , 根据式(8), 计算出  $\sin\Delta\theta$  并与零值做差后通入 PI 调节器进行调节, 得到频率扰动量  $\omega_{syn}$ ; 测量 PCC 点两侧电压有效值并将两者做差后通入 PI 调节器进行调节, 得到幅值扰动量  $u_{syn}$ 。将  $\omega_{syn}$  代入到 VSG 有功-频率控制中, 将  $u_{syn}$  代入到 VSG 无功-电压控制中, 即可实现 VSG 输出电压与电网电压同步。

根据上述分析, 可得到改进后预同步控制框图, 如图 6 所示。

## 3 仿真实验与分析

为了验证本文所提控制策略的正确性和有效性, 利用 MATLAB/Simulink 搭建基于 VSG 控制的微电网逆变器仿真模型。仿真模型的主要参数如下:

(1) 三相主电路参数。直流侧电压  $U_{dc} =$

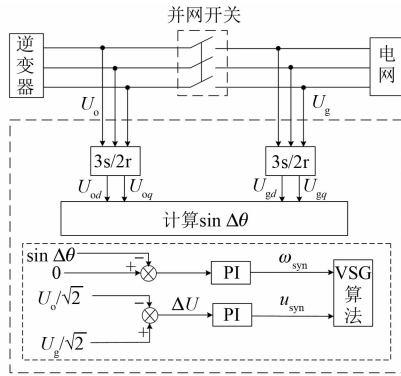


图6 改进后预同步方法控制框图

800 V, LC 滤波器滤波电感  $L_f = 3$  mH、滤波电容  $C_f = 20$   $\mu$ F, 开关频率  $f_c = 6$  kHz, 线路阻抗  $R_1 = 0.27$   $\Omega$ 、 $L_1 = 0.3$  mH。

(2) VSG 算法及控制器参数。调速器参数  $K_\omega = 9\ 598.85$ , 励磁器参数  $K_q = 3.11 \times 10^{-3}$ , 阻尼系数  $D = 10$ , 转动惯量  $J = 0.5$   $\text{kg} \cdot \text{m}^2$ , 有功功率给定  $P_{\text{ref}} = 20$  kW, 无功功率给定  $Q_{\text{ref}} = 10$  kvar。

(3) 系统额定输出参数(电网参数)。额定线电压  $U_N = 380$  V,  $f_N = 50$  Hz。

### 3.1 仿真模型参数设计

#### 3.1.1 LC 滤波器参数设计

针对 LC 滤波器, VSG 输出电流纹波由滤波电感  $L_f$  决定, 电流纹波系数  $\alpha$  取额定电流的 15%~20%, 本文取  $\alpha = 15\%$ , VSG 效率  $\eta = 1$ 。则最大纹波电流  $\Delta I_{\text{max}}$  为

$$\Delta I_{\text{max}} = \alpha \cdot \frac{P}{\eta U_s} \quad (9)$$

式中:  $P$  为 VSG 输出有功功率;  $U_s$  为 VSG 输出相电压有效值。

文献[12]对电感取值范围的选取应满足:

$$\frac{U_{\text{dc}}}{4f_c \cdot \Delta I_{\text{max}}} \leq L_f < \left| \frac{U_{\text{dc}} - U_m \sin \omega t}{I_m \omega \cos \omega t} \right| \quad (10)$$

式中:  $f_c$  为逆变器开关频率;  $U_m$ 、 $I_m$  分别为 VSG 输出相电压和电流幅值。

本文取  $U_{\text{dc}} = 800$  V,  $U_s = 220$  V,  $P = 20$  kW,  $Q = 10$  kvar,  $f_c = 6$  kHz, 则  $U_m = 311$  V,  $I_m = 48$  A。将以上参数代入式(9)和式(10)中可得:  $2.44$  mH  $\leq L_f < 48.80$  mH。最终选择滤波电感  $L_f = 3$  mH。

根据谐振频率  $f_k$  确定滤波电容  $C_f$  取值。谐振频率计算式为

$$f_k = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_f C_f}} \quad (11)$$

一般取  $10f_n \leq f_k \leq f_c/5$ ,  $f_n = 50$  Hz, 即谐振频率在 500~1 200 Hz 之间, 本文取  $f_k = 650$  Hz, 代入式(11)可得滤波电容  $C_f = 20$   $\mu$ F。最终选择滤波电容  $C_f = 20$   $\mu$ F。

综上所述, LC 滤波器中  $L_f = 3$  mH,  $C_f = 20$   $\mu$ F。

#### 3.1.2 转动惯量和阻尼系数参数设计

以文献[16]和文献[22]中关于 VSG 转动惯量和阻尼系数的参数设计方法为参考, 兼顾系统稳定性和动态性能, 利用最优二阶系统概念, 取系统阻尼比  $\xi = 0.707$ , 最终选择转动惯量  $J = 0.5$   $\text{kg} \cdot \text{m}^2$ , 阻尼系数  $D = 10$ 。

#### 3.1.3 VSG 控制器参数设计

根据电能质量要求, 设计 VSG 输出频率变化  $\pm 0.25$  Hz, 输出有功功率变化 100%, 即 20 kW。频率在 49.75~50.25 Hz 之间变化, 则有功-频率下垂系数  $K_\omega$  为

$$K_\omega = \frac{\Delta P}{2\pi\Delta f} - D\omega_0 = \frac{20\ 000}{2\pi \times 0.25} - 10 \times 314 = 9\ 598.85 \quad (12)$$

对于无功-电压下垂系数, 设计 VSG 输出电压幅值变化 10%, 输出无功功率变化 100%, 即 10 kvar, 则无功-电压下垂系数  $K_q$  为

$$K_q = \frac{\Delta V}{\Delta Q} = \frac{220 \times \sqrt{2} \times 10\%}{10\ 000} = 3.11 \times 10^{-3} \quad (13)$$

综上所述, 有功-频率下垂系数(调速器参数)  $K_\omega = 9\ 598.85$ , 无功-电压下垂系数(励磁器参数)  $K_q = 3.11 \times 10^{-3}$ 。

### 3.2 VSG 离网运行

单台 VSG 带载运行, 验证 VSG 有功-频率和无功-电压特性。初始状态下, 系统所带负载为三相对称负载, 负载功率为 20 kW+10 kvar, 1 s 时负载突增一倍, 1.5 s 时负载恢复至初始值, 2 s 时仿真结束。仿真结果如图 7~图 10 所示。

在 1 s 时, 原有负载 20 kW+10 kvar 突增一倍, 由图 7 可以看出, 有功负载增加 20 kW, VSG 输出频率降低且变化  $\Delta f = \Delta P / (2\pi K_\omega) = 0.25$  Hz。由图 8 可以看出, 无功负载增加, 则 VSG 输出电压减小。由图 9、图 10 可以看出, VSG 输出有功

功率和无功功率均能够跟随负荷变化,输出相应功率,验证了 VSG 离网运行特性的正确性。由 VSG 频率变化曲线可知,在负载变化时 VSG 频率能够表现出与同步发电机一样的惯性,有利于保证系统频率稳定。

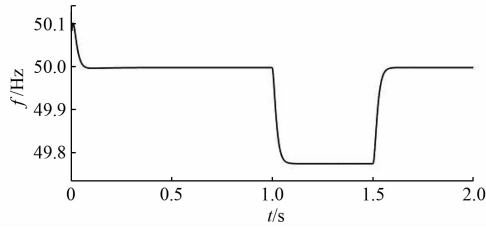


图 7 VSG 离网运行时输出频率

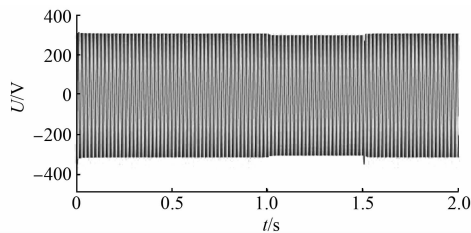


图 8 VSG 离网运行时输出电压

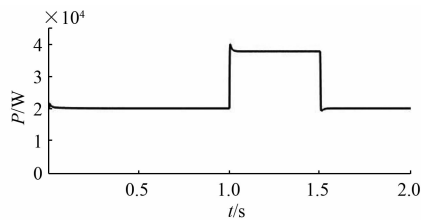


图 9 VSG 离网运行时输出有功功率

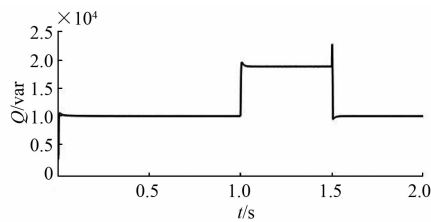


图 10 VSG 离网运行时输出无功功率

### 3.3 VSG 并网运行

VSG 并网运行,验证 VSG 并网模式下的功率增发特性。初始状态下,系统带 20 kW+10 kvar 负载运行,在 1 s 时设定有功突变,VSG 有功功率给定值由 20 kW 突增至 30 kW;在 2 s 时设定无功突变,VSG 无功功率给定值由 10 kvar 突增至 15 kvar,3 s 时仿真结束。仿真结果如图 11~图 14 所示。

由图 11、图 12 可看出,VSG 在并网情况下其输出电压和频率由大电网提供支撑,均能恢复至额定值。由图 13、图 14 可看出,根据所采用的控制策略及选取的仿真参数,VSG 在并网情况下能够按照给定的有功和无功指令进行功率输出,即 VSG 输出功率能够准确跟踪指令值,由于 VSG 输出有功与无功之间未完全解耦,存在相互影响。由此验证了 VSG 并网运行特性的正确性。

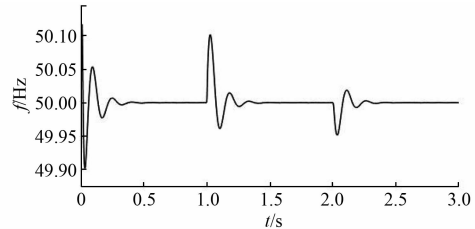


图 11 VSG 并网运行时输出频率

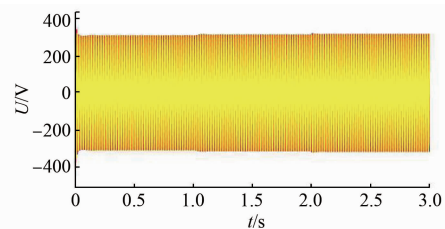


图 12 VSG 并网运行时输出电压

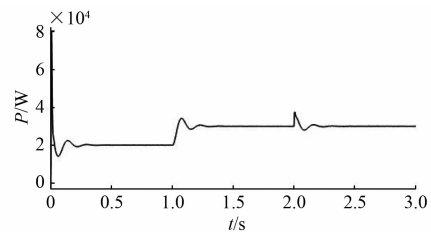


图 13 VSG 并网运行时输出有功功率

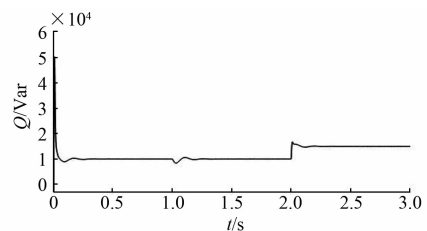


图 14 VSG 并网运行时输出无功功率

### 3.4 VSG 离/并网平滑切换

设定 VSG 控制的分布式电源逆变器输出电压 A 相初始相位为  $0^\circ$ ,电网电压 A 相初始相位

为  $60^\circ$ 。

仿真工况:0.4 s 以前 VSG 离网运行,0.4 s 时开始预同步,1.3 s 时满足并网条件,闭合并网开关,VSG 并网运行,1.8 s 时无功功率给定值由 10 kvar 阶跃至 5 kvar,2.3 s 时有功功率给定值由 20 kW 阶跃至 30 kW,4 s 时并网开关断开,VSG 切换为离网运行,5 s 时仿真结束。仿真结果如图 15~图 23 所示。

由图 15、图 16 可看出,VSG 在并网后的功率输出能够跟随指令值变化且功率冲击受到抑制,因为 VSG 输出有功与无功之间未完全解耦,所以存在相互影响。

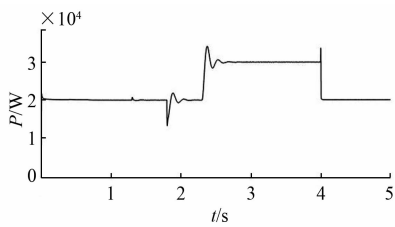


图 15 VSG 输出有功功率

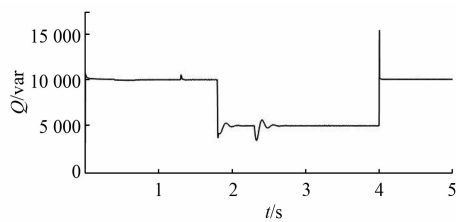


图 16 VSG 输出无功功率

由图 17 可看出,VSG 输出电流在并网瞬间未出现较大冲击,并且在功率指令变化时 VSG 输出电流能够跟随变化且波动较小,满足系统要求。

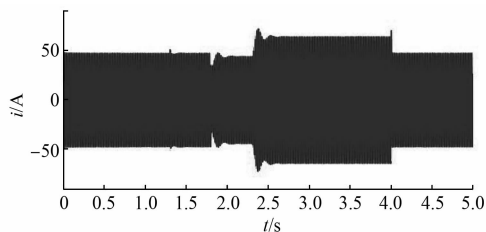


图 17 VSG 输出电流

由图 18 可看出,VSG 输出电压在整个过程中波动很小,几乎不受影响且恒压输出。

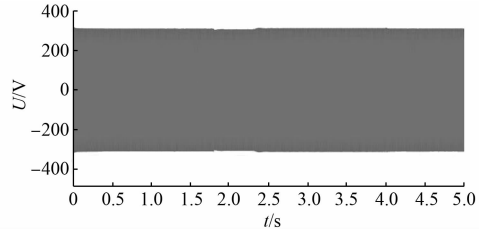


图 18 VSG 输出电压

由图 19、图 20 可看出,在 1.3 s 并网前,PCC 点两侧电压幅值差和相位差均几乎为零,达到并网标准,可以闭合并网开关实现并网。

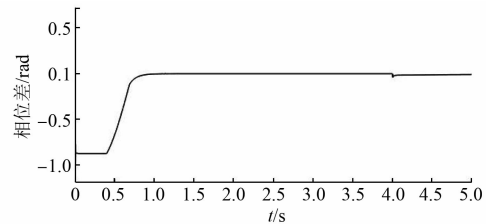


图 19 相位差波形

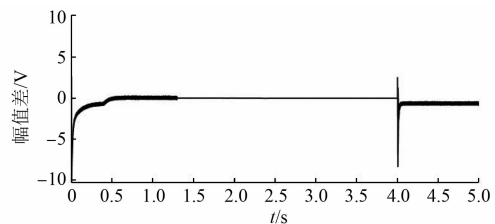


图 20 幅值差波形

由图 21、图 22 可以直观看出,在 VSG 并网前 PCC 点两侧电压可实现幅值和相位同步,保证 VSG 在 1.3 s 时平滑并网。

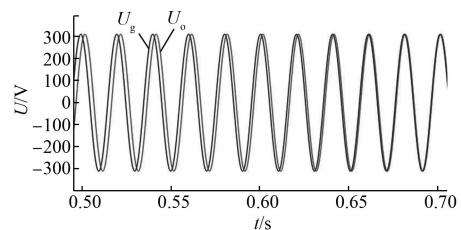


图 21 两侧电压预同步波形

由图 23 可看出,在并网瞬间冲击电流很小,约为 1.7 A,不会对分布式电源逆变器和电网造成不利影响,可实现 VSG 平滑并网。

为了验证所提控制策略能够适应 VSG 离/并网过程中系统各种运行条件(如电网电压不平

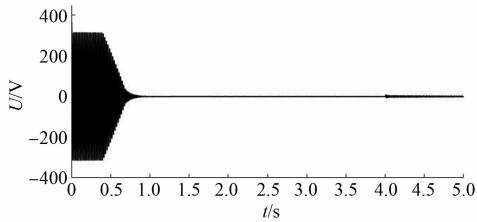


图 22 两侧 A 相电压瞬时差值波形

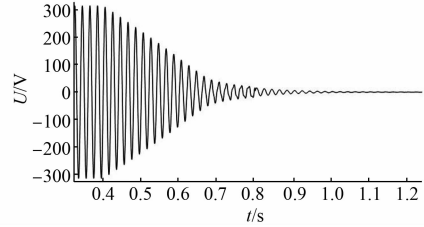


图 25 电网电压不平衡条件下两侧 A 相电压瞬时差值波形

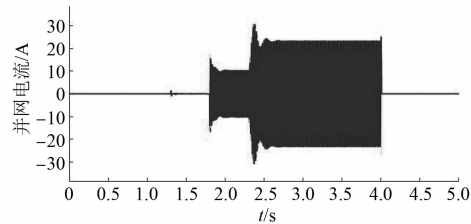


图 23 并网电流波形

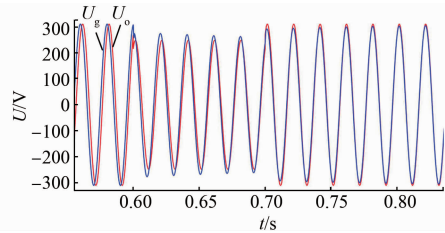


图 26 电网电压跌落条件下两侧电压预同步波形

衡、电网电压短时跌落和电网电压存在谐波等条件),3 种运行条件下 VSG 离/并网过程中 PCC 点两侧电压预同步波形和两侧 A 相电压瞬时差值波形。分别如图 24~图 29 所示。

与上述仿真条件相同,设定 0.6 s 时电网 A 相电压由 220 V 下降至 176 V (跌落 44 V),0.8 s 时电压恢复,构造电网电压不平衡运行条件。由图 24、图 25 可看出,VSG 并网前 PCC 点两侧电压可适应该运行条件实现幅值和相位同步,保证 VSG 在 1.3 s 时平滑并网。

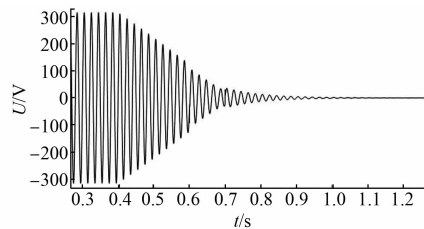


图 27 电网电压跌落条件下两侧 A 相电压瞬时差值波形

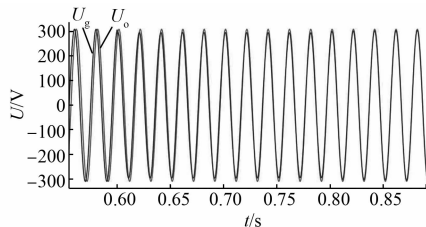


图 24 电网电压不平衡条件下两侧电压预同步波形

设定 0.6 s 时电网线电压由 380 V 跌落至 304 V (跌落 76 V),0.7 s 时电压恢复,构造电网电压短时跌落运行条件。由图 26、图 27 可看出,VSG 并网前 PCC 点两侧电压可适应该运行条件实现幅值和相位同步,保证 VSG 在 1.3 s 时平滑并网。

设定 0.5 s 时电网电压中出现幅值为 44 V 的 2 次谐波及幅值为 33 V 的 3 次谐波,0.7 s 时谐波

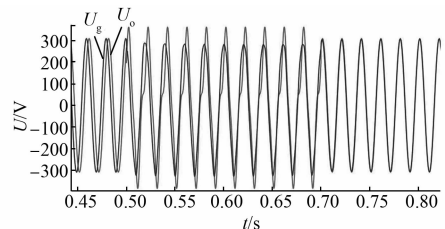


图 28 电网存在谐波条件下两侧电压预同步波形

通过仿真结果和相应分析,验证了所提改进预同步控制策略的正确性和有效性,并说明该控制策略在多种运行条件下具有较强的适应性。

### 3.5 传统与改进预同步控制方法间的对比

为了验证所提改进预同步控制方法的优越性,设定仿真条件及工况与 3.4 节相同,对比分析



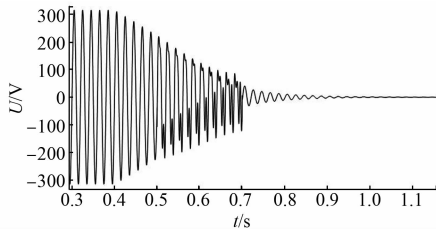


图 29 电网存在谐波条件下两侧 A 相电压瞬时差值波形

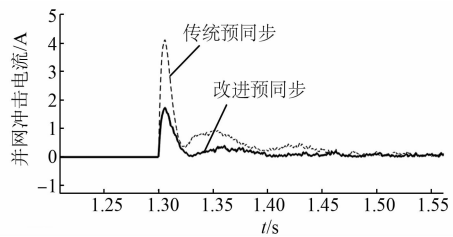


图 32 并网瞬间 VSG 冲击电流波形对比

传统(有 PLL) 预同步与改进(无 PLL) 预同步 2 种控制方法。并网瞬间 VSG 输出有功、无功对比和冲击电流波形对比如图 30~图 32 所示。

由图 30、图 31 和图 32 可直观看出来,在 1.3 s 并网瞬间,改进预同步方法下 VSG 输出有功、无功冲击和冲击电流大小分别为 20.75 kW、10.6 kvar、1.7 A,而传统预同步方法下 VSG 输出有功、无功冲击和冲击电流大小分别为 21.80 kW、11.4 kvar、4.2 A。由此可知,改进预同步方法比传统预同步方法能够明显抑制并网瞬间 VSG 输出有功和无功冲击且减小冲击电流,提高离/并网切换过程系统稳定性。由此验证了所提改进预同步控制策略的优越性。

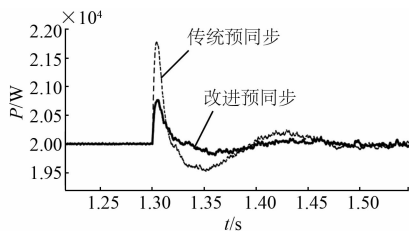


图 30 并网瞬间 VSG 输出有功对比

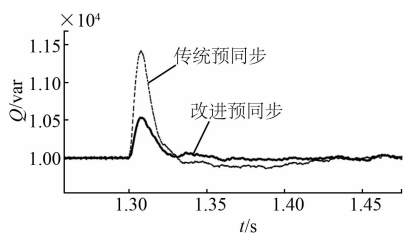


图 31 并网瞬间 VSG 输出无功对比

## 4 结 语

本文分析了 VSG 基本原理,对功频调节器、励磁调节器和电磁方程等控制部分进行了设计,并给出相应控制结构框图。针对基于 VSG 控制的微电网逆变器离/并网平滑切换控制策略,在传

统预同步方法基础上进行改进,省去 2 个 PLL 且只需要 2 个 PI 调节器,预同步速度和精度不受 PLL 干扰,运算量减少且控制结构简单,在切换瞬间电压、电流变化幅度很小且能够抑制功率冲击,为系统提供惯性和阻尼支撑,实现 VSG 离/并网运行模式的平滑切换。仿真结果验证了所提控制策略的正确性和优越性,并证明该控制策略在 VSG 离/并网多种运行条件下具有较强的适应性。另外,该控制策略可推广到多台 VSG 并联运行的微电网中,具有一定的实用价值。

## 【参考文献】

- [ 1 ] 吕志鹏,盛万兴,刘海涛,等. 虚拟同步机技术在电力系统中的应用与挑战[J]. 中国电机工程学报, 2017,37(2): 349.
- [ 2 ] 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.
- [ 3 ] RAMEZANI M, LI S, MUSAVI F, et al. Seamless transition of synchronous inverters using synchronizing virtual torque and flux linkage[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2020,67(1): 319.
- [ 4 ] 周建萍,胡成奕,茅大钧,等. 基于虚拟电机的 V2G 新型充放电控制策略[J]. 电机与控制应用,2020, 47(2): 97.
- [ 5 ] 杨旭红,王阔姝. 一种改进的 LCL 并网逆变器控制方法的研究[J]. 电机与控制应用,2017,44(9): 67.
- [ 6 ] 余璞. 基于虚拟同步发电机的微网逆变器并网技术研究[D]. 成都:西南交通大学,2016.
- [ 7 ] 郝新星,苏建徽,施永,等. 基于虚拟同步机的微网并网切换策略研究[J]. 电气传动,2016,46(1): 50.
- [ 8 ] 施凯,焦龙,徐培凤,等. 微电网逆变器并/离网切换控制策略[J]. 信息技术,2018,42(10): 52.
- [ 9 ] 李新,刘国梁,杨苒晨,等. 具有暂态阻尼特性的虚拟同步发电机控制策略及无缝切换方法[J]. 电网技术,2018,42(7): 2081.

(下转第 103 页)

## 【参考文献】

- [ 1 ] SCHWEIZER M, FRIEDLI T, KOLAR J W. Comparative evaluation of advanced three-phase three-level inverter/converter topologies against two-level systems [ J ]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60( 12 ): 5515.
- [ 2 ] VIDET A, LE MOIGNE P, IDIR N, et al. A new carrier-based PWM providing common-mode-current reduction and DC-bus balancing for three-level inverters [ J ]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2007, 54( 6 ): 3001.
- [ 3 ] WU X, TAN G, YE Z, et al. Virtual-space-vector PWM for a three-level neutral-point-clamped inverter with unbalanced DC-links [ J ]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33( 3 ): 2630.
- [ 4 ] LIU G, WANG D, WANG M, et al. Neutral-point voltage balancing in three-level inverters using an optimized virtual space vector PWM with reduced commutations [ J ]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, 65( 9 ): 6959.
- [ 5 ] LIU G, WANG D, JIN Y, et al. Current-detection-independent dead-time compensation method based on terminal voltage A/D conversion for PWM VSI [ J ]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64( 10 ): 7689.
- [ 6 ] 杨兵建, 杨波, 何湘宁, 等. 三电平逆变器中的死区效应与补偿 [ J ]. 电力电子技术, 2011, 45( 3 ): 4.
- [ 7 ] 金舜, 钟彦儒, 明正峰, 等. 一种控制中点电位并消除窄脉冲的三电平 PWM 方法 [ J ]. 中国电机工程学报, 2003, 23( 10 ): 114.
- [ 8 ] 金舜, 钟彦儒. 一种新颖的同时考虑中点电位平衡和窄脉冲消除及死区补偿的三电平空间电压矢量脉宽调制方法 [ J ]. 中国电机工程学报, 2005, 25( 6 ): 60.
- [ 9 ] 李敏裕, 马晓军, 魏曙光, 等. 三电平虚拟空间矢量脉宽调制算法窄脉冲抑制研究 [ J ]. 电工技术学报, 2018, 33( 14 ): 3264.
- [ 10 ] 王琛琛, 管勃. 一种兼顾二极管钳位型三电平变换器中点电位平衡的窄脉冲处理方法 [ J ]. 电工技术学报, 2015, 30( 19 ): 136.
- [ 10 ] 周鹏, 张新燕, 邸强, 等. 基于虚拟同步机控制的双馈风电机组预同步并网策略 [ J ]. 电力系统自动化, 2020, 44( 14 ): 71.
- [ 11 ] 魏亚龙, 张辉, 孙凯, 等. 基于虚拟功率的虚拟同步发电机预同步方法 [ J ]. 电力系统自动化, 2016, 40( 12 ): 124.
- [ 12 ] 陈杰, 陈新, 冯志阳, 等. 微网系统并网/孤岛运行模式无缝切换控制策略 [ J ]. 中国电机工程学报, 2014, 34( 19 ): 3089.
- [ 13 ] 施永, 赖纪东, 苏建徽, 等. 微网系统运行模式平滑切换控制策略 [ J ]. 电力系统自动化, 2016, 40( 8 ): 85.
- [ 14 ] 占伟强, 吴振兴, 邢鹏翔, 等. 虚拟同步发电机及其在独立型微电网中的应用 [ J ]. 电机与控制应用, 2017, 44( 4 ): 14.
- [ 15 ] DU W, FU Q, WANG H F. Power system small-signal angular stability affected by virtual synchronous generators [ J ]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34( 4 ): 3209.
- [ 16 ] 漆岳. 基于虚拟同步机的微网并网逆变器控制策略研究 [ D ]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.
- [ 17 ] 郑竞宏, 王燕廷, 李兴旺, 等. 微电网平滑切换控制方法及策略 [ J ]. 电力系统自动化, 2011, 35( 18 ): 17.
- [ 18 ] AOUNI R, MARINESCU B, KILANI K B, et al. Synchronverter-based emulation and control of HVDC transmission [ J ]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31( 1 ): 278.
- [ 19 ] 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.
- [ 20 ] 曹元峥. 基于虚拟同步发电机的微电网逆变器控制策略研究 [ D ]. 合肥: 合肥工业大学, 2017.
- [ 21 ] SHINTAI T, MIURA Y, ISE T. Oscillation damping of a distributed generator using a virtual synchronous generator [ J ]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2014, 29( 2 ): 668.
- [ 22 ] 郝新星. 基于虚拟同步机的微网逆变器控制策略及系统稳定性研究 [ D ]. 合肥: 合肥工业大学, 2015.

~~~~~  
 (上接第 90 页)