

DOI: 10.7667/PSPC171359

# 合并有源滤波功能的虚拟同步发电机控制策略

蔡晓峰<sup>1</sup>, 张鸿博<sup>2</sup>, 李鑫<sup>3</sup>

(1. 河南工程学院机械工程学院, 河南 郑州 451191; 2. 华北水利水电大学电力学院, 河南 郑州 450045;  
3. 河南工程学院安全工程学院, 河南 郑州 451191)

**摘要:** 提出一种虚拟同步发电机与有源滤波器相结合的并网逆变器统一控制策略。分析了虚拟同步发电机的指令电流与电网谐波电压的关系, 论证了统一控制策略中提取电网基波电压用于虚拟同步发电机指令电流生成的必要性, 并给出了基于多重二阶广义积分器结构的虚拟同步发电机指令电流生成算法。分析了虚拟同步发电机在多功能并网逆变器中应用引起的冲击电流问题并提出了改进方法。利用 Matlab/Simulink 对系统进行了仿真, 验证了所提出改进控制策略的正确性。

**关键词:** 并网逆变器; 虚拟同步发电机; 有源滤波; 多功能; 电能质量

## Control strategy of virtual synchronous generator combined with active power filter

CAI Xiaofeng<sup>1</sup>, ZHANG Hongbo<sup>2</sup>, LI Xin<sup>3</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, Henan University of Engineering, Xinzheng 451191, China;  
2. School of Electric Power, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450045, China;  
3. School of Safety Engineering, Henan University of Engineering, Xinzheng 451191, China)

**Abstract:** A novel combined control strategy for both virtual synchronous generator and Active Power Filter (APF) is proposed. The relationship between the reference current of virtual synchronous generator and the harmonic voltage of power network is analyzed, the necessity of extracting the fundamental voltage for the reference current generation in the combined control strategy is demonstrated, and a virtual generator reference current generation algorithm based on multiple second-order generalized integrator structure is given. The shock current caused by the application of virtual synchronous generator in the multi-function grid-connected inverter is analyzed, and the improvement method is put forward. System simulation is carried out on Matlab/Simulink and simulation results verify the validity of the proposed control strategy.

This work is supported by Scientific and Technological Breakthrough Plan of Henan Province (No. 172102310757 and No. 182102210333).

**Key words:** grid-connected inverter; virtual synchronous generator; active power filter; multi-function; power quality

## 0 引言

近年来, 随着分布式发电技术的快速发展, 越来越多的分布式电源并入电网<sup>[1-2]</sup>, 作为分布式电源与电网的接口设备, 并网逆变器具有控制灵活、响应迅速等优点, 但也存在缺少惯性等不足<sup>[3]</sup>。为改善并网逆变器的性能, 有学者提出了虚拟同步发电机(Virtual Synchronous Generator, VSG)技术<sup>[4-6]</sup>, 其核心思想是借鉴同步发电机的运行机理控制并网逆

变器, 使分布式电源具有类似同步发电机的转动惯性、一次调频/调压等特性, 该技术为分布式电源的友好并网提供了良好途径, 受到学者们的普遍关注。

目前已有不少文献对虚拟同步发电机技术开展了研究<sup>[7-12]</sup>, 但研究内容主要集中在虚拟发电机策略本身, 而作为一种电力电子装置, 并网逆变器在借鉴同步发电机优点的同时, 也不能一味只模拟同步机, 应尽可能发挥电力电子装置的优势。为了充分发挥并网逆变器的作用, 更大限度地挖掘并网逆变器的价值, 文献[13-15]提出了在并网逆变器中融入有源滤波(Active Power Filter, APF)等功能的方案, 然而它们针对的都是传统逆变器, 未融入VSG

基金项目: 河南省科技攻关计划项目资助(172102310757, 182102210333)

技术, 缺乏类似同步发电机的转动惯量及一次调频调压能力, 而这些功能正是VSG技术所具备的。因此, 如何将VSG技术与与有源滤波技术结合在一起, 在发挥VSG优势的同时实现电能质量调节治理的功能是一个值得研究的课题。

基于此, 本文提出了VSG与有源滤波相结合的并网逆变器控制策略, 通过对常规VSG控制策略的改进, 实现其与有源滤波功能的有效融合。

## 1 并网逆变器的VSG控制策略

图1为并网逆变器的结构示意图, 图中 $U_{dc}$ 为逆变器直流侧储能电池电压,  $L_1$ 、 $L_2$ 为输出滤波器的电感,  $C$ 为滤波器电容,  $R_c$ 为阻尼电阻。

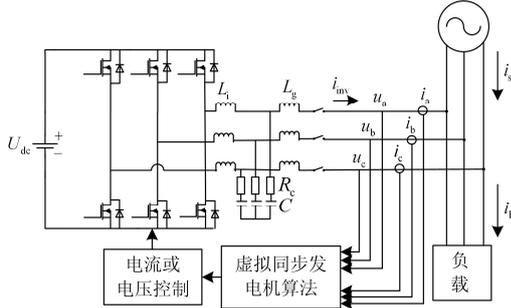


图1 并网逆变器结构图

Fig. 1 Structure of the grid-connected inverter

并网逆变器的VSG控制算法如式(1)所示<sup>[2,4]</sup>。

$$\begin{cases} T_m - T_e - D\Delta\omega = \frac{P_m}{\omega} - \frac{P_e}{\omega} - D\Delta\omega = J \frac{d\Delta\omega}{dt} & (a) \\ \frac{d\theta}{dt} = \omega & (b) \\ e_{abc} = u_{abc} + i_{abc}r + L \frac{di_{abc}}{dt} & (c) \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $T_m$  和  $T_e$  分别为机械转矩和电磁转矩;  $P_m$  和  $P_e$  分别为机械功率和电磁功率;  $D$  为定常阻尼系数;  $\Delta\omega$  为电角速度差,  $\Delta\omega = \omega - \omega_n$ ,  $\omega_n$  和  $\omega$  分别为额定电角速度和实际电角速度;  $J$  为同步发电机的转动惯量;  $\theta$  为电角度;  $e_{abc}$ ,  $u_{abc}$ ,  $i_{abc}$  分别为 $k$ 相感应电动势、定子端电压和定子电流;  $r$  和  $L$  分别为定子电枢电阻和电感。

## 2 VSG与APF的融合

VSG有输出电流控制和输出电压控制两种实现方式<sup>[5]</sup>, 为了便于和APF功能融合, 本文采用输出电流控制方式。两种功能融合关键在于对并网指令电流进行合理计算。指令电流计算包含VSG并网发电指令电流的计算与APF补偿指令电流计算以及上述两者的合成运算。

### 2.1 VSG指令电流计算

为了描述方便起见, 首先说明VSG指令电流的计算, 计算原理如图2所示。

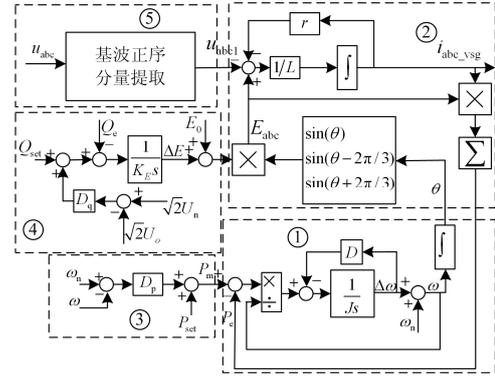


图2 VSG指令电流计算原理图

Fig. 2 Diagram of VSG reference current calculation

图2中:  $P_{set}$ 和 $Q_{set}$ 为给定的有功功率和无功功率;  $P_e$ 和 $Q_e$ 为VSG输出的有功功率和无功功率;  $D_p$ 为有功-频率下垂系数;  $D_q$ 为无功-电压下垂系数;  $U_o$ 为输出电压有效值;  $U_n$ 为额定电压有效值。

图2中模块1对应转子运动方程, 模块2对应定子电气方程, 模块3为有功调节模块, 模块4为无功调节模块。这里需要特别强调的是模块5, 即基波正序分量提取模块, 该模块的作用是将采样得到的并网点电压 $u_{abc}$ 的基波正序分量提取出来送给定子电气方程(模块2)去计算VSG指令电流, 而不是将 $u_{abc}$ 直接送给模块2, 因为电网电压中可能含有谐波和不平衡分量, 而这些分量会影响VSG与APF的融合效果, 原因如下:

根据式(1)(c)  $e_k = u_k + i_k r + L di_k/dt$  ( $k=a,b,c$ ), 对于稳态运行的VSG, 其角速度 $\omega$ 稳定不变, VSG的虚拟电势 $e_k$ 只含有基波正序成分, 设

$$e_k(t) = E \sin(\omega t + \theta_e) \quad (2)$$

如果电网电压 $u_k$ 含有高次谐波, 简化起见, 不妨设 $u_k(t) = U \sin(\omega t + \theta_u) + U_h \sin(\omega_h t + \theta_h)$ , 则

$$\begin{aligned} L di_k/dt + i_k r &= E \sin(\omega t + \theta_e) - \rightarrow \\ &\leftarrow U \sin(\omega t + \theta_u) - U_h \sin(\omega_h t + \theta_h) \end{aligned} \quad (3)$$

$$\text{令 } \omega_1 = \omega, \quad \phi_h = \pi + \theta_h,$$

$$U_1 \sin(\omega_1 t + \phi_1) = E \sin(\omega_1 t + \theta_e) - U \sin(\omega_1 t + \theta_u),$$

则式(3)可改写为

$$L di_k/dt + i_k r = U_1 \sin(\omega_1 t + \phi_1) + U_h \sin(\omega_h t + \phi_h) \quad (4)$$

以上方程中的 $i_k$ 可看做两个不同频率电压源作用在 $L-r$ 电路上产生的响应, 根据叠加原理,  $i_k$ 又可以看做每个电压源单独作用时响应的叠加, 即

$$i_k = i_{k1} + i_{kh}$$

假设电感初始电流为零, 根据一阶电路的零状态响应特征, 每个电压源单独作用时的响应都可以写成如下形式<sup>[16]</sup>。

$$i_{ki}(t) = \frac{U_i}{\sqrt{R^2 + \omega_i^2 L^2}} \sin(\omega_i t + \phi_i - \varphi_i) \rightarrow \leftarrow -\frac{U_i}{\sqrt{R^2 + \omega_i^2 L^2}} \sin(\phi_i - \varphi_i) e^{-\frac{R}{L}t} \quad (5)$$

式中:  $i = 1, h$ ;  $\varphi_i = \arctan(\omega_i L/R)$

式(5)中, 随着指数分量的衰减, 稳态时  $i_{ki}$  将是一个和等式右侧同频率的信号。这说明如果 VSG 端口处出现谐波电压, 则 VSG 将对应地产生同频率的谐波电流。从物理意义上讲,  $L$ 、 $r$  相当于同步发电机的定子电感和电阻, 当电网电压同时存在基波和谐波时, 电网基波电压(与 VSG 虚拟电势一起)作用在定子电感和电阻上产生基波电流, 而谐波电压作用在定子电感和电阻上产生谐波电流。此外, 如果电网电压不对称, 存在负序分量, 则负序电压作用在定子电感和电阻上还会产生负序电流。由于 VSG 的定子电感和电阻通常都不大, 因此即使很小的负序或谐波电压作用在定子上也会产生可观的负序和谐波电流。比如假设 220 V(单相)电网中基波负序电压含量 1%(2.2 V), 5 次谐波含量 3%(6.6 V), VSG 定子电感  $L=5$  mH, 基波电抗  $\omega L=1.57 \Omega$ , 5 次谐波电抗  $5\omega L=7.85 \Omega$ , 则产生的负序电流为  $2.2 \text{ V}/1.75 \Omega=1.26 \text{ A}$ , 产生的 5 次谐波电流为  $6.6 \text{ V}/7.85 \Omega=0.84 \text{ A}$ , 假定逆变器并网功率 10 kW, 并网电流为  $10000/(\sqrt{3} \times 380)=15.2 \text{ A}$ , 则 5 次谐波电流含量可达 5.5%, 负序电流三相不平衡度达到 8.3%, 超过了公用电网的电能质量要求<sup>[17]</sup>。

由此可见, 电网负序电压和谐波电压导致的 VSG 指令电流不能忽略, 尤其对于电网电压不平衡度或谐波含量偏高、VSG 定子电抗偏小的场合更是如此。在多功能逆变器中, 负载负序和谐波电流会通过 APF 补偿指令电流检测算法检测出来并会合成到最终指令电流上去, 如果 VSG 产生的指令电流中含有负序和谐波电流, 将会导致最终合成的指令电流中负序和谐波电流是过剩的, 进而影响负序和谐波电流抵消的效果。为避免出现这种情况, 必须从  $u_{abc}$  中提取基波正序分量送给 VSG, 使 VSG 只发出基波正序电流, 而常规的 VSG 控制对输出的负序和谐波电流要求并不苛刻, 如文献[5-6]中 VSG 的实现方案中均未考虑对  $u_{abc}$  提取基波正序分量, 但当 VSG 应用于多功能逆变器中时这却是必须的。

值得一提的是, VSG 的定子电抗会随着谐波频率的升高而变大, 因此同样幅值的谐波电压作用在

VSG 上, 谐波频率越高, 产生的谐波电流越小, 这是比较有利的一面。利用 VSG 这一特点, 在提取电网基波电压的过程中, 可以忽略频率较高的高次谐波的影响, 因此基波提取时只考虑滤除 3、5、7 次谐波, 而对含量很小的偶次谐波和 7 次以上的高次谐波可以不予考虑。

本文采用的电压基波正序分量提取器是基于多重二阶广义积分器结构(Multiple Second-order Generalized Integrator, MSOGI)<sup>[18]</sup>, 原理如图3。

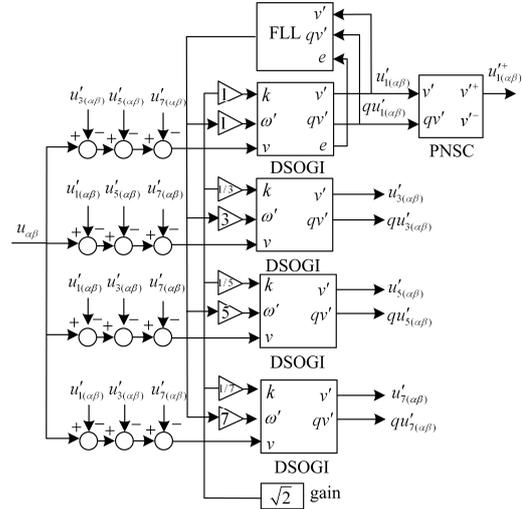


图3 基于MSOGI的基波正序分量提取

Fig. 3 Positive fundamental component extraction based on MSOGI-FLL

图3中的DSOGI由两个SOGI组成, 分别对 $\alpha\beta$ 两个分量进行处理, SOGI构成如图4所示。 $k$ 值与滤波器的带宽和动态响应速度密切相关, 一般 $k$ 值取 $\sqrt{2}$ 。

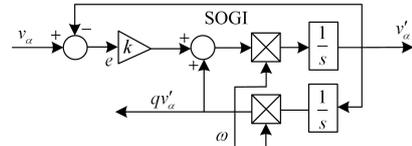


图4 SOGI原理图

Fig. 4 Principle of SOGI

图3中PNSC模块为正负序分离检测模块, 该模块利用DSOGI的输出  $u'_{1(\alpha\beta)}$ 、 $qu'_{1(\alpha\beta)}$  实现基波正负序分量的检测, 由于这里只需检测正序分量, 仅给出正序分量检测原理:

$$\begin{aligned} u'_{1\alpha} &= 0.5(u'_{1\alpha} - qu'_{1\beta}) \\ u'_{1\beta} &= 0.5(qu'_{1\alpha} + u'_{1\beta}) \end{aligned} \quad (6)$$

图3中FLL为频率跟随模块<sup>[18]</sup>, 使算法具有良好的频率自适应能力, 在电网频率发生波动时依然能保持较高的检测精度。

该基波正序分量提取器可以过滤掉基波负序分量, 并通过反馈对消除特定次的高次谐波, 为VSG算法提供计算所需的基波正序分量, 从而有效避免了VSG产生出谐波电流和负序电流。

## 2.2 APF补偿指令电流计算

APF补偿指令电流的计算通常采用 $i_p$ - $i_q$ 法, 在 $\alpha\beta$ 坐标系到 $dq$ 同步旋转坐标系变换过程中, 同步旋转角 $\theta$ 正弦、余弦可直接由电压 $u_{1\alpha}^+$ 、 $u_{1\beta}^+$ 两个分量计算<sup>[19]</sup>, 这样可以直接利用图3的输出, 省去锁相环节。算法原理如图5所示。

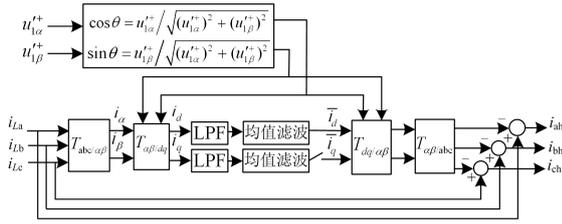


图5 补偿电流检测原理框图

Fig. 5 Principle of harmonic current detection

图5中,  $i_{La}$ 、 $i_{Lb}$ 、 $i_{Lc}$ 为三相负载电流,  $i_d$ 、 $i_q$ 为 $d$ 轴、 $q$ 轴分量,  $\bar{i}_d$ 、 $\bar{i}_q$ 为 $i_d$ 、 $i_q$ 的直流分量, LPF为低通滤波器, 这里选用截止频率30 Hz的2阶Butterworth低通滤波器。 $i_{ah}$ 、 $i_{bh}$ 、 $i_{ch}$ 为补偿指令电流, 简称为 $i_{abc\_apf}$ , 其中包含了负载的高次谐波电流、负序电流、基波无功电流。

该算法利用电压正序分量在 $\alpha\beta$ 轴上的分量实时计算 $dq$ 变换需要正余弦值, 省去了锁相环节, 简化了算法实现。在低通滤波环节采用了Butterworth低通滤波器和均值滤波器串联的形式, 以获得较好的检测精度和动态响应速度<sup>[20]</sup>。

## 2.3 指令电流的合成

目标指令电流的合成原理如图6, 通过计算得到的VSG指令电流、APF补偿电流相加即得目标指令电流。

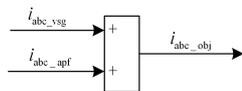


图6 目标指令电流合成

Fig. 6 Combination of target current

由于APF补偿电流 $i_{abc\_apf}$ 中已经包含了需要补偿的谐波电流, 如果VSG指令电流 $i_{abc\_vsg}$ 中也含有谐波电流的话, 那么相当于逆变器补偿了负载的谐波电流后又向电网注入了新的谐波电流, 无疑给电网带来了新的谐波污染, 因此在VSG指令电流中不能含有谐波电流。同样道理, VSG指令电流中也不能含有负序电流。

## 3 指令电流的跟踪控制方法

很明显, 多功能并网逆变器目标指令电流是个多谐波的信号。通常采用的跟踪控制方法有滞环控制、比例积分(PI)控制、比例谐振(PR)控制<sup>[21]</sup>、重复控制<sup>[22-24]</sup>等。滞环控制开关频率不固定; PI控制需要多个频率下的旋转坐标变换, 计算复杂; PR控制需要使用多个谐振调节器, 也比较复杂, 且计算量较大。比较而言, 重复控制比较容易实现且其也非常适合于对周期性信号的跟踪控制, 这里为了提高并网逆变器的动、静态性能, 采用重复控制与PI控制相结合的组合策略, 并在两相静止坐标系中实现<sup>[22]</sup>, 控制原理如图7<sup>[23-24]</sup>。

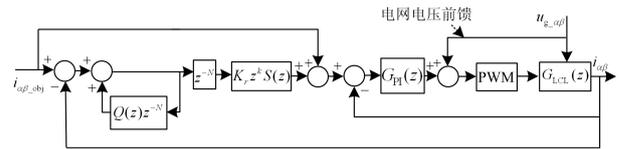


图7 PI+重复控制原理图

Fig. 7 Diagram of PI and repeat control

图中,  $G_{LCL}(z)$ 为控制对象离散化传递函数, 在这里也就是LCL滤波器的离散化传递函数,  $G_{PI}(z)$ 为PI控制器离散化传递函数,  $N$ 为每周期的采样点数,  $i_{\alpha\beta\_obj}$ 为指令电流,  $i_{\alpha\beta\_obj} = T_{abc/\alpha\beta} i_{abc\_obj}$ ,  $i_{\alpha\beta}$ 为控制对象输出电流。有关参数的整定在文献<sup>[22-24]</sup>中有比较详细的介绍, 不是本文研究的对象, 这里不再详述。

## 4 VSG多功能逆变器的并网冲击抑制

由于在改进VSG策略中引入了MSOGI\_FLL基波正序分量提取环节, 该环节从初始状态到稳定状态需要一个过渡过程, 如图8所示。

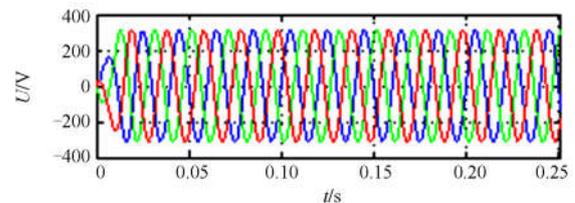


图8 基波正序电压提取过渡过程波形

Fig. 8 Transient process waveform of positive fundamental voltage extraction

从图8中可以看出, MSOGI\_FLL输出的基波正序电压是从0开始逐渐过渡到稳态的, 如果在过渡过程中就将VSG定子电气方程式1(c)投入, 则初始时刻, 方程中的 $u_{abc}=0$ , 而VSG的三相电势 $E$ 不为0,

而是在额定值附近，因此相当于全部电势加在定子绕组上进而产生巨大的冲击电流，图9是通过仿真得到了冲击电流波形，从图中可以看出，冲击电流接近200 A，逆变器难以承受。为避免这个冲击电流，比较简单的方法就是在VSG并网投运时先投入基波电压提取环节，基波正序电压稳定后再投入VSG的其他环节。

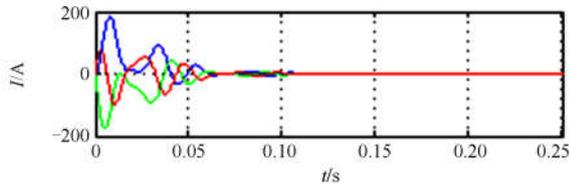
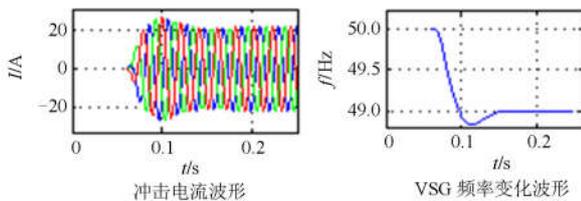


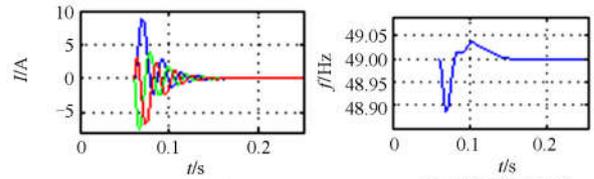
图 9 冲击电流波形

Fig. 9 Shock current waveform

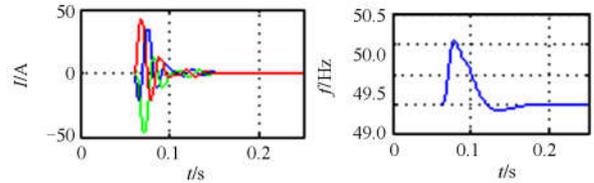
MSOGI-FLL输出的基波正序电压从0过渡到稳态所需要的时间主要取决于频率跟随模块(FLL)实现频率跟随所需的时间，根据文献[18]的分析和设计，当频率突变时FLL模块频率跟随所需时间约为100 ms<sup>[18]</sup>，但在60 ms左右FLL模块输出频率已经很接近稳态值了，因此为缩短并网过程，本文在MSOGI基波电压提取环节投入后延迟3个工频周期(60 ms)考虑投入VSG功能。但必须指出，并不是延迟3个周期后任意时刻都可以投入，因为VSG在投运时相当于一个初相角 $\theta$ 为0、角频率为 $\omega_n$ 、电势为 $E_0$ 的同步发电机，如果并网时VSG的电势 $E_0$ 和电网电压幅值或相角相差大还是会起很大的冲击，这个过程类似于同步发电机的准同期并网。为避免VSG投入过渡过程中冲击过大，应设置VSG的状态和电网的状态相一致，具体来说，就是①将VSG的角频率 $\omega_n$ 和电网角频率设置相同，②将VSG电势 $E_0$ 和电网电压幅值设置相同，③选择在a相电网电压过零点处并网，从而达到并网时VSG电压与电网电压同步的目的，另外，为了使VSG并网时为空载状态，还需设置图2中 $P_{set}$ 、 $Q_{set}$ 为零。图10反映了VSG多功能逆变器在不满足上述①②③条中任一条情况下并网的仿真结果(注：不满足其中一条指不满足某一条但满足另外两条，且 $P_{set}$ 、 $Q_{set}$ 均被设置为零。另仿真中电网相电压幅值均为300 V，频率均为49 Hz，a相初相角即0时刻相角均为0°)。



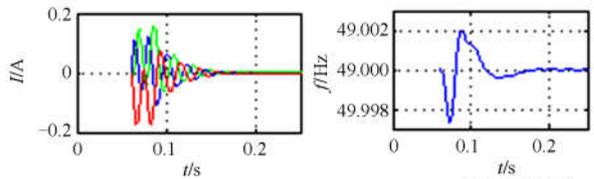
(a) 电网电压与 VSG 电势不满足条件① ( $\omega=0.98\pi$ , VSG  $\omega_n=100\pi$ )



(b) 电网电压与 VSG 电势不满足条件② (电网电压幅值为 300 V, VSG 电势  $E_0$  为 311 V)



(c) 电网电压与 VSG 电势不满足条件③ (并网时电网 a 相相位为  $10^\circ$ )



(d) 电网电压与 VSG 电势同时满足条件①②③

图 10 冲击电流波形及VSG频率变化波形

Fig. 10 Waveform of shock current and VSG frequency fluctuation

对比图10(a)—图10(d)可以看出，按本文提出的方法并网可以将VSG很快与电网拉入同步，冲击电流很小(不到0.2 A)，而不满足本文条件时并网冲击电流大很多。

### 5 仿真分析

针对本文提出的SVG多功能逆变器控制策略，利用Matlab/Simulink 进行了仿真验证，仿真的微电网结构如图11所示。

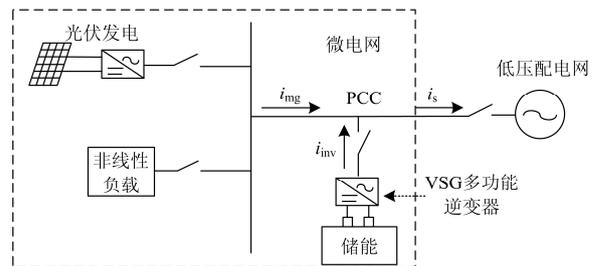


图11 仿真微电网结构

Fig. 11 Micro-grid structure for simulation

图中VSG型多功能逆变器挂接在PCC处，以便在并网发电的同时，改善微电网的输出电能质量，VSG型多功能逆变器主要参数如表1，表中功率环

的参数选择参考了文献[25]。

表 1 仿真参数表

Table 1 Simulation parameters

$U_{dc}$	800 V	$K_E$	7.1	$D_p$	1 592 W.s/rad
$L$	5 mH	$D_q$	321 var/V	$\omega_n$	100 $\pi$ rad/s
$r$	0.5 $\Omega$	$U_n$	220 V	$P_{set}$	10 kW
$D$	0	$Q_{set}$	0 var	$J$	0.057 kgm <sup>2</sup>

另外微电网本地负载如图12所示。仿真中光伏发电功率设定为5 kW, 电网电压含有3%的5次谐波以及1%的负序电压。逆变器开关频率20 kHz。

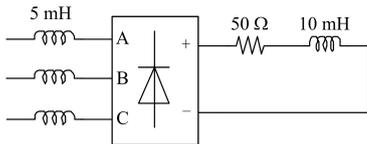


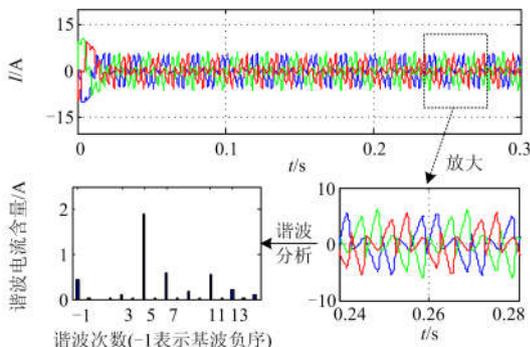
图 12 微电网本地负载

Fig. 12 Local load of micro-grid

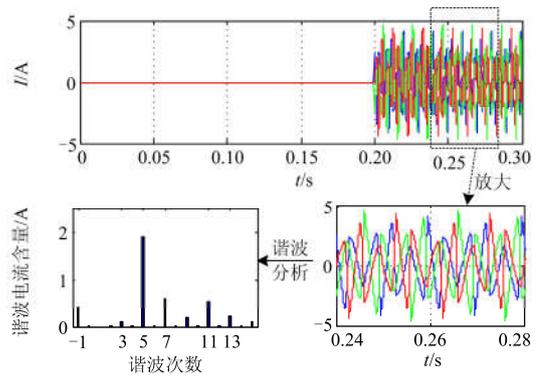
仿真过程中, 根据第4节中的方法首先投入电网基波正序电压提取模块, 0.06 s时投入VSG模块, 0.1 s时调节VSG模块的 $P_{set}=10$  kW, 即让VSG按额定功率运行, 0.2 s时投入APF补偿电流指令计算模块。

由于改进 VSG 只是将电网电压基波正序分量提取出来作用于 VSG 算法上, 并未改变 VSG 算法的主体, 其运行效果等效于只考虑电网电压基波正序分量作用的常规 VSG, 因此常规 VSG 具有的调频调压能力及转动惯量特征改进 VSG 也同样具有。由于常规 VSG 的转动惯量和调频调压能力已有许多文献进行过分析和验证, 本文不再重复, 以下仅就 VSG 与 APF 统一控制中的有源滤波能力进行仿真验证, 为便于对比控制效果, 分别按两种情况进行仿真:

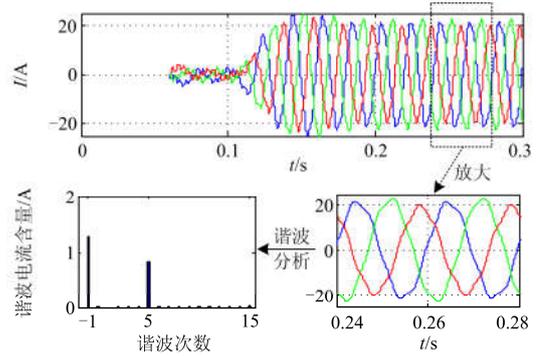
1) 多功能逆变器中使用常规VSG算法(以下简称常规VSG, 即图2中取消模块5,  $U_{abc}$ 直接作用在定子电气方程上), 仿真结果见图13。为清楚显示谐波含量, 谐波电流含量图中未显示基波正序电流值。



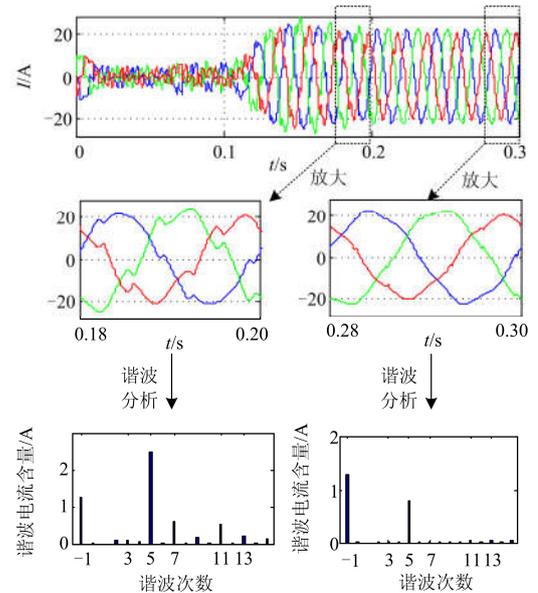
(a) 微电网原始并网电流( $i_{mg}$ )波形及谐波含量



(b) APF指令电流( $i_{abc\_apf}$ )及谐波含量



(c) 常规VSG指令电流( $i_{abc\_vsg}$ )及谐波含量



(d) 常规VSG下PCC处并网电流( $i_i$ )及谐波含量

图 13 仿真结果1

Fig. 13 Simulation result 1

2) 多功能逆变器采用改进的VSG算法(以下简称改进VSG), 仿真结果见图14。为清楚显示谐波含量, 谐波含量图中未显示基波正序电压值。

从图13(a)可以看出, 由于电网电压畸变及负载非线性等因素, 微电网原始并网电流 $i_{mg}$ 中存在负序

和谐波电流，图13(b)表明APF补偿电流算法可以准确检测 $i_{mg}$ 中的谐波和负序分量，图13(c)表明当电网电压存在基波负序及5次谐波分量时常规VSG指令电流中对应地含有基波负序电流和5次谐波电流，图13(d)通过对0.2 s前后谐波分量的对比表明(0.2 s是投入APF补偿电流指令计算模块的时刻)：虽然APF补偿电流算法可以检测并补偿微网电流 $i_{mg}$ 中的谐波

和负序分量，但VSG产生的谐波和负序电流仍然会使并网电流畸变，分析表明，0.3 s时并网电流THD仍达到5.5%，三相不平衡度达到9.0%，因此将常规VSG直接应用于多功能逆变器效果不佳，并网电流谐波畸变率和三相不平衡度均偏高。

从图14(a)可以看出，改进的VSG算法利用MSOGI-FLL提取出电网电压中的基波正序分量，精度很高，其中的负序和谐波电压均被抑制在0.1 V以下；图14(b)表明将提取出的基波正序电压作用于VSG，则VSG只生成基波正序电流，负序和谐波电流极其微弱，有效避免了常规VSG算法自身产生的谐波及负序电流对电能质量的影响；图14(c)表明改进后的VSG算法在0.2 s与APF补偿电流算法结合后能成功补偿微网电流 $i_{mg}$ 中的谐波及负序分量。分析表明，0.3 s时并网电流THD仅为0.59%，三相不平衡度仅为0.04%，APF功能成功融入了VSG逆变器中。

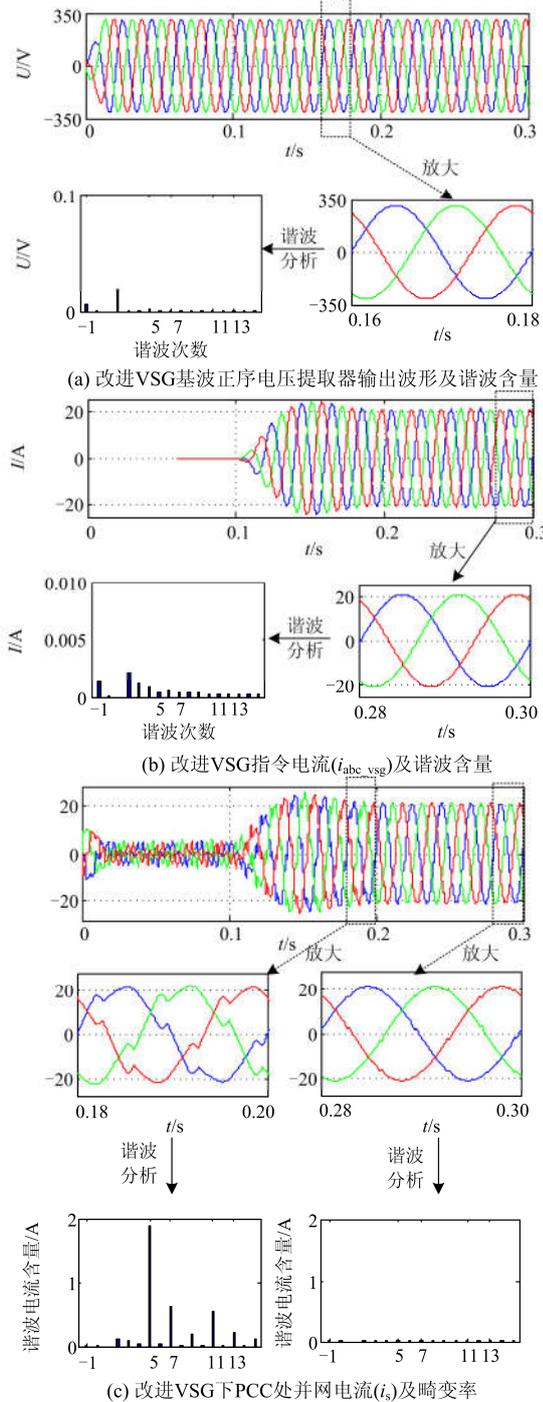


图14 仿真结果2

Fig. 14 Simulation result 2

### 6 结论

1) 虚拟同步发电机的指令电流受电网负序电压和谐波电压的影响，与APF结合时需要过滤谐波和负序电压、提取出基波正序电压用于生成虚拟发电机指令电流，否则会影晌谐波抵消的效果。

2) 改进虚拟发电机指令电流算法通过MSOGI-FLL提取出电网基波正序电压用于VSG指令电流的计算，有效降低了指令电流中的谐波和负序成分，与APF结合能有效减少对电网的谐波注入。

3) VSG多功能逆变器在并网投运过程中要注意避免冲击电流。为此，一方面在模块投入顺序上要先投入基波正序分量提取模块，延时3个周期后再考虑投入VSG模块；另一方面，VSG模块投入时要将其几个重点参数设置为和电网一致。

### 参考文献

[1] 吴鸣, 于辉, 熊雄. 分布式电源接入配电网的基本原则[J]. 供用电, 2017, 34(12): 32-38.  
WU Ming, YU Hui, XIONG Xiong. Basic principles for integration of distributed generation into power distribution network[J]. Distribution & Utilization, 2017, 34(12): 32-38.

[2] 王守相, 葛磊蛟, 张齐, 等. 配电网分布式能源接纳能力影响因素分析[J]. 供用电, 2016, 33(4): 2-7, 63.  
WANG Shouxiang, GE Leijiao, ZHANG Qi, et al. Impact factor analysis of distributed energy accommodation capacity for distribution networks[J]. Distribution & Utilization, 2016, 33(4): 2-7, 63.

[3] 王成山, 李琰, 彭克. 分布式电源并网逆变器典型控制方法综述[J]. 电力系统及其自动化学报, 2012, 24(2):

- 12-20.  
WANG Chengshan, LI Yan, PENG Ke. Overview of control methods for grid-connected inverters of distributed generation[J]. Proceedings of the CSU-EPSSA, 2012, 24(2): 12-20.
- [4] 丁明, 杨向真, 苏建徽. 基于虚拟同步发电机思想的微电网逆变电源控制策略[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.
- [5] 张兴, 朱德斌, 徐海珍. 分布式发电中的虚拟同步发电机技术[J]. 电源学报, 2012(3): 1-6.  
ZHANG Xing, ZHU Debin, XU Haizhen. Review of virtual synchronous generator technology in distributed generation[J]. Journal of Power Supply, 2012(3): 1-6.
- [6] 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 based distributed generation unit and its application in micro-grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(16): 2591-2603.
- [7] 王思耕, 葛宝明, 毕大强. 基于虚拟同步发电机的风电场并网控制研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(21): 49-54.  
WANG Sigeng, GE Baoming, BI Daqiang. Control strategies of grid-connected wind farm based on virtual synchronous generator[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(21): 49-54.
- [8] 祝钧, 李瑞生, 毋炳鑫, 等. 交直流混合微电网接口变换器虚拟同步发电机控制方法[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(11): 28-34.  
ZHU Jun, LI Ruisheng, WU Bingxin, et al. Virtual synchronous generator operation of interlinking converter between AC and DC microgrids[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(11): 28-34.
- [9] 程启明, 张宇, 谭冯忍, 等. 基于 Washout 滤波器的虚拟同步发电机新型控制方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(16): 51-57.  
CHENG Qiming, ZHANG Yu, TAN Fengren, et al. Research on new control method of virtual synchronous generator based on Washout filter[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(16): 51-57.
- [10] 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.  
ZHENG Tianwen, CHEN Laijun, CHEN Tianyi, et al. Review and prospect of virtual synchronous generator technologies[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(21): 165-175.
- [11] 党克, 许泽鹏, 车永亮. 微电网中的虚拟同步发电机技术[J]. 广东电力, 2017, 30(2): 7-12, 21.  
DANG Ke, XU Zepeng, CHE Yongliang. Virtual synchronous generator technology in micro-grid[J]. Guangdong Electric Power, 2017, 30(2): 7-12, 21.
- [12] 王超, 武健, 魏家昊, 等. 改进型虚拟同步发电机控制策略[J]. 广东电力, 2017, 30(12): 38-42.  
WANG Chao, WU Jian, WEI Jiahao, et al. Control strategy for improved virtual synchronous generator[J]. Guangdong Electric Power, 2017, 30(12): 38-42.
- [13] 杨秋霞, 刘大鹏, 王海臣, 等. 光伏并网发电与电能质量调节统一控制系统[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(5): 69-74.  
YANG Qiuxia, LIU Dapeng, WANG Haichen, et al. A combined control approach for grid-connected photovoltaic and power quality regulatory systems[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(5): 69-74.
- [14] 康成功, 李献伟, 张国军. 分布式电源参与的配电网电能质量控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(16): 99-105.  
KANG Chengong, LI Xianwei, ZHANG Guojun. Research on power quality control strategy incorporating distributed generation[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(16): 99-105.
- [15] 曾正, 杨欢, 赵荣祥. 多功能并网逆变器及其在微电网中的应用[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(4): 28-34.  
ZENG Zheng, YANG Huan, ZHAO Rongxiang. Multifunctional grid-connected inverter and its application in microgrid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(4): 28-34.
- [16] 邱关源. 电路[M]. 北京: 高等教育出版社, 2011.
- [17] 全国电压电流等级和频率标准化技术委员会. 电能质量公用电网谐波: GB/T 14549-93[S]. 北京: 中国标准出版社, 1993.  
Technical Committee for Standardization of National Voltage and Current Ratings and Frequencies. Quality of electric energy supply harmonics in public supply networks: GB/T 14549-93[S]. Beijing: Standards Press of China, 1993.
- [18] RODRIGUEZ P, LUNA A, CANDELA I, et al. Multiresonant frequency-locked loop for grid synchronization of power converters under distorted grid conditions[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58(1): 127-138.

- [19] 陈东华, 谢少军, 周波. 用于有源电力滤波器谐波和无功电流检测的一种改进同步参考坐标法[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(20): 62-67.  
CHEN Donghua, XIE Shaojun, ZHOU Bo. An improved synchronous reference frame method for harmonics and reactive currents detection of active power filters[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(20): 62-67.
- [20] 周柯, 罗安, 夏向阳, 等. 一种改进的 ip-iq 谐波检测方法及其数字低通滤波器的优化设计[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(34): 96-101.  
ZHOU Ke, LUO An, XIA Xiangyang, et al. An improved ip-iq harmonic current detecting method and digital low-pass filter's optimized design[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(34): 96-101.
- [21] 周娟, 张勇, 耿乙文, 等. 四桥臂有源滤波器在静止坐标系下的改进 PR 控制[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(6): 113-119.  
ZHOU Juan, ZHANG Yong, GENG Yiwen, et al. An improved proportional resonant control strategy in the static coordinate for four-leg active power filters[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(6): 113-119.
- [22] 张学广, 马彦, 李瑞, 等. 两相静止坐标系下并网逆变器的重复控制策略[J]. 电工技术学报, 2016, 31(9): 85-91.  
ZHANG Xueguang, MA Yan, LI Rui, et al. Repetitive control strategy for grid-connected converters in stationary frame[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(9): 85-91.
- [23] 郑诗程, 徐礼萍, 郎佳红, 等. 基于重复PI控制和前馈控制的静止无功发生器[J]. 电工技术学报, 2016, 31(6): 219-225.  
ZHENG Shicheng, XU Liping, LANG Jiahong, et al. Static var generator based on repetitive PI control and feedforward control[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(6): 219-225.
- [24] 王斯然, 吕征宇. LCL 型并网逆变器中重复控制方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(27): 69-75.  
WANG Siran, LÜ Zhengyu. Research on repetitive control method applied to grid-connected inverter with LCL filter[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(27): 69-75.
- [25] 吴恒, 阮新波, 杨东升, 等. 虚拟同步发电机功率环的建模与参数设计[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(24): 6508-6518.  
WU Heng, RUAN Xinbo, YANG Dongsheng, et al. Modeling of the power loop and parameter design of virtual synchronous generators[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(24): 6508-6518.

收稿日期: 2017-09-12; 修回日期: 2018-02-27

作者简介:

蔡晓峰(1981—), 女, 硕士, 讲师, 研究方向为分布式发电技术; E-mail: cxfzjy@126.com

张鸿博(1980—), 男, 通信作者, 硕士, 讲师, 研究方向为电力电子技术在电力系统中的应用。E-mail: zhbnbcwu@163.com

(编辑 葛艳娜)