

无锁相环自同步 VSG 控制策略

王颖伟¹, 王博², 姚伟星³

(1. 内蒙古交通职业技术学院 交通运输工程系, 内蒙古 赤峰 024005; 2. 中国农业大学 理学院, 北京 100083; 3. 南京师范大学泰州学院 电力工程学院, 江苏 泰州 225300)

摘要: 虚拟同步发电机(VSG)是微电网或智能电网整合方案之一。VSG并网时需要专用的同步单元,如锁相环(PLL)等,以收集电网电压相位信息,但增加了控制器设计复杂度。针对这个问题,设计了一种移除PLL的自同步VSG控制方案。新方案能在逆变器并网前自动与电网电压同步,并在并网完成后准确跟踪电网相位,提高了控制性能,并降低了控制复杂性和计算负担。同时自同步不影响到VSG本身的功能,如频率和电压调节、有功和无功功率控制等。利用VSG并网试验平台对无PLL自同步控制策略进行了测试,实验结果表明,自同步控制策略可在无PLL的时候准确地实现频率跟踪,并提高VSG功率控制性能。

关键词: 微电网; 虚拟同步发电机; 下垂控制; 锁相环; 同步

中图分类号: TM762 **文献标识码:** A **DOI:** 10.19457/j.1001-2095.dqcd20267

Self-synchronized VSG Control Strategy Without Phase-locked Loop

WANG Yingwei¹, WANG Bo², YAO Weixing³

(1. Department of Transportation Engineering, Inner Mongolia Career Technical College, Chifeng 024005, Nei Monggol, China; 2. College of Science, China Agricultural University, Beijing 100083, China; 3. School of Electric Power Engineering, Nanjing Normal University Taizhou College, Taizhou 225300, Jiangsu, China)

Abstract: The virtual synchronous generator (VSG) is a solution for microgrid or smart grid integration. When the VSG is connected to the grid, a dedicated synchronization unit, such as a phase-locked loop, is needed to collect the grid voltage phase information, which increases the complexity of controller design. Aiming at it, a self-synchronized VSG control scheme for removing the phase-locked loop was designed. The new scheme could automatically synchronize with the grid voltage before the inverter was connected to the grid, and accurately track the grid phase after the completion of the grid connection, in which the control performance was improved and the control complexity as well as computational burden was reduced. At the same time, self-synchronization did not affect the functions of the VSG, such as frequency and voltage regulation, active and reactive power control. The VSG grid-connected test platform was used to test the self-synchronization control strategy without phase-locked loop. The experimental results show that the self-synchronization control strategy can accurately achieve frequency tracking without phase-locked loop and improve VSG power control performance.

Key words: microgrid; virtual synchronous generator (VSG); droop control; phase-locked loop (PLL); synchronization

随着可再生能源迅猛发展,逆变器并网技术得到了广泛研究^[1],其中虚拟同步发电机(VSG)技术由于引入了同步发电机特性^[2],是一种较优的逆变器并网策略。类似于其他并网技术,VSG并网前后必须和电网同步。通常的解决方案是使用锁相环(PLL)^[3],或其他基于PLL的改进方案^[4-5],或其他采用其他同步原理的无PLL方案^[6-8]。PLL增加了控

制器复杂度,同时其对控制性能有负面影响^[9]。此外,由于PLL本质上是非线性的,因此整个系统都是非线性的,PLL参数的整定过程是复杂和耗费时间的^[10]。文献[6]针对弱网条件给出了一种基于虚拟坐标系无PLL同步方案,算法计算量小,但使用了较多低通滤波器,延迟大,影响了同步速度。文献[7]利用电网电压与相角的内在对应关系,基于查

基金项目: 教育部高等学校电气类专业教学指导委员会教改课题(DQJZW2016007)

作者简介: 王颖伟(1982—),男,本科,讲师,Email: 1486218617@qq.com

表计算和数字低通滤波获得实时相位,同步速度快但计算量大,同时查表法的精度不高。文献[8]提出了一种基于Hilbert变换和预设旋转频率的无PLL电网同步检测方法,同步速度和精度都较好,但算法复杂,计算量大,占据的硬件资源较多。

综上所述,由于同步较慢会直接影响控制性能并降低系统稳定性,故控制器需快速且准确地完成同步并保持,这使得同步策略的设计具有挑战性。目前,众多研究集中在提高PLL的速度和准确性等^[1],但依然存在PLL带来的非线性问题。而基于其他同步原理的无PLL方案则大多存在由于计算密集,精度和速度必须折衷的问题。因此,在本文中,将采取一种全新的思路,即移除PLL,然后将同步功能嵌入到VSG功率控制器中,提出了一种无PLL自同步VSG控制方案。这将从系统中删除掉非线性,使系统控制器设计更为容易。相对于其他不含PLL的同步方案^[6-8],新的无PLL自同步方案在原VSG控制器架构上实现,无新增的计算单元,在保证同步速度和精度的基础上,只需要较小的计算量。且新方案基于VSG内核原理实现,扩大了系统带宽,提高了同步快速准确性,加强了系统性能,而且降低了整个控制器的复杂度。最后,仿真和实验结果证明了所提出的自同步VSG控制策略能在正常运行和电网故障下表现出优异的性能。

1 VSG控制原理

VSG是一种逆变器控制方案,可模拟传统的同步发电机。使用VSG可较容易地将分布式发电并入电网中,并轻松地参与系统频率和电压调节。图1、图2分别为VSG主电路图和控制器框图。

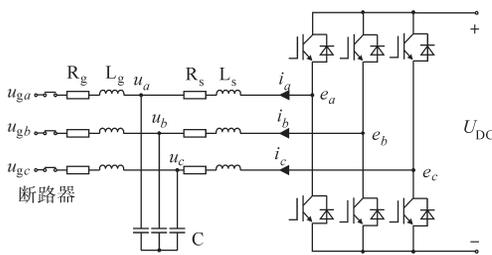


图1 VSG主电路图
Fig.1 Diagram of the VSG main circuit

通常,VSG直流母线电压稳定可通过将直流电压控制器和储能装置结合起来实现。VSG控制器中包含了三相同步发电机数学模型,如下所示:

$$\ddot{\theta} = \frac{1}{J} (T_m - T_c - D_p \dot{\theta}) \quad (1)$$

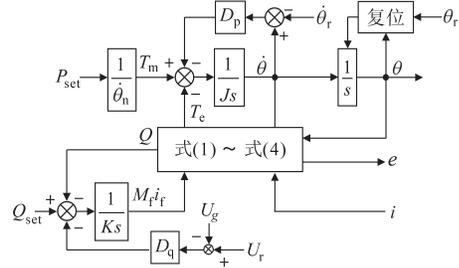


图2 VSG控制器结构框图
Fig.2 Block diagram of VSG controller structure

$$T_c = M_f i_f \langle \mathbf{i}, \mathbf{\sin\theta} \rangle \quad (2)$$

$$e = \dot{\theta} M_f i_f \mathbf{\sin\theta} \quad (3)$$

$$Q = -\dot{\theta} M_f i_f \langle \mathbf{i}, \mathbf{\cos\theta} \rangle \quad (4)$$

其中 $\mathbf{\sin\theta} = [\sin\theta, \sin(\theta - 2\pi/3), \sin(\theta + 2\pi/3)]^T$
 $\mathbf{\cos\theta} = [\cos\theta, \cos(\theta - 2\pi/3), \cos(\theta + 2\pi/3)]^T$
 式中: T_m, T_c, e, θ, J 和 Q 分别为 VSG 机械转矩、VSG 电磁转矩、VSG 三相电压、VSG 转子角、VSG 转动惯量和无功功率; i_f 为励磁电流; M_f 为 VSG 定子绕组和励磁绕组之间的互感; $\dot{\theta}$ 为 VSG 虚拟角速度,也即 PWM 生成模块的控制信号 e 的频率; $\ddot{\theta}$ 为 VSG 虚拟角加速度; D_p 为虚拟机械摩擦系数; \mathbf{i} 为从 VSG 输出的定子电流矢量。

本文中假设 VSG 每相极对数为 1,故 VSG 机械转速与电磁场转速相同。

VSG有功功率由频率下垂控制回路控制,使用虚拟机械摩擦系数 D_p 作为反馈增益。该闭环调节的是 VSG 虚拟角速度 $\dot{\theta}$,并为控制信号 e 产生相角 θ 。VSG无功功率由电压下垂控制回路控制,使用电压下垂系数 D_q 作为反馈增益。该闭环调节的是 VSG 励磁 $M_f i_f$,其与所产生的电压幅值成正比。

控制 VSG 并网运行时,需要一个同步单元来为 VSG 控制器提供电网的信息,以便在并网前与电网电压同步,并使 VSG 并网完成后顺利地输出有功和无功功率入网。

2 自同步VSG控制策略设计

2.1 并网的同步发电机

图3所示为并网同步发电机电路图,图中所示为每个单相的模型。

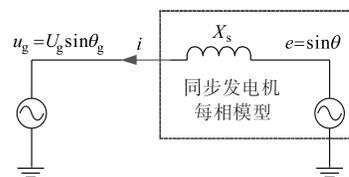


图3 并网同步发电机电路图
Fig.3 Circuit diagram of grid-connected synchronous generator

同步发电机有功功率 P 和无功功率 Q 分别为

$$P = 3U_g E \sin(\theta - \theta_g) / (2X_s) \quad (5)$$

$$Q = 3U_g [E \cos(\theta - \theta_g) - U_g] / (2X_s) \quad (6)$$

式中: U_g 为电网电压幅值; E 为同步发电机输出电压幅值,其可由励磁调节器控制; θ_g 和 θ 分别为电网电压和同步发电机输出电压相位(VSG由 $M_i i_r$ 控制); X_s 为同步发电机同步电抗。

定义相位差如下:

$$\delta = \theta - \theta_g \quad (7)$$

式中: δ 为功率角,由原动机的驱动转矩控制。根据式(5)和式(6),电网电压幅值 U_g 和对应相角 θ_g 可用作 E 和 θ 的参考,以输出合适的 P 和 Q 。当原动机驱动转矩 T_m 增加时, δ 增加并增大输送到电网的有功功率,直到电功率等于由原动机输出的机械功率。 δ 增加的上限值为 $\pi/2$,如果机械功率持续增加并导致 δ 增加超过上限,则同步发电机的转子将加速直至失去与电网的同步,这是应该要避免的。基于式(6),可通过控制 E 来调节无功功率 Q 。当 $E = U_g, \theta = \theta_g$ 时,并网同步发电机与电网间无功功率交换。换言之,如果 P 和 Q 被控制为零,则条件满足,同时发电机电压与电网电压相同。此时,同步发电机可在不引起较大动态前提下并网或脱网。这个结论可用于在并网前VSG与电网的同步。

2.2 自同步VSG控制器

对图2中VSG控制器进行改进,可得到所提出无PLL自同步VSG控制器,如图4所示。

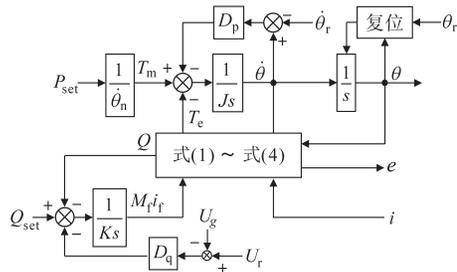


图4 自同步VSG控制器框图

Fig.4 Block diagram of self-synchronized VSG controller

新型自同步VSG控制器对比原VSG控制器的主要变化为:1)从 e 和 u_g 的误差中生成虚拟电流 i_s ,然后设置一个两路选择开关来控制 i_s 或者电网电流 i_g 馈入控制器;2)增加一个PI模块来调节频率下垂模块 D_p 的输出 ΔT 为零,并产生参考频率 $\dot{\theta}_r$ 。为了便于自同步VSG的运行,添加3个模式开关 S_C, S_P 和 S_Q 以改变运行模式。当开关 S_C 置于位置1,同时 S_P 闭合,且 S_Q 断开时(可设置连锁,

S_C 置于位置1,自动闭合 S_P 和断开 S_Q),则VSG工作在自同步模式。此时, P_{set} 和 Q_{set} 均设置为0,VSG可与电网同步。当VSG与电网同步后,可闭合图1中的主回路断路器以将逆变器接入电网。当 S_C 置于位置2时,VSG有4种不同的工作模式,如表1所示。

表1 自同步VSG的不同工作模式

Tab.1 Different operation modes of self-synchronized VSG

开关 S_C	开关 S_P	开关 S_Q	工作模式
1	闭合	断开	自同步模式
2	闭合	闭合	PQ_D 模式
2	闭合	断开	PQ模式
2	断开	闭合	$P_D Q_D$ 模式
2	断开	断开	$P_D Q$ 模式

2.3 自同步VSG并网后的运行

如前所述,VSG的功率角 δ 可由功率指令 P_{set} 计算得到的虚拟机械转矩 T_m 控制:

$$T_m = P_{set} / \dot{\theta} \approx P_{set} / \dot{\theta}_n \quad (8)$$

式中: $\dot{\theta}_n$ 为标称电网频率; P_{set} 为有功功率指令。

当 S_P 闭合时,通过PI控制器将 ΔT 在稳态下控制为零。故 T_e 等于 T_m ,而VSG频率被控制为

$$\dot{\theta} = \dot{\theta}_r = \dot{\theta}_n + \Delta \dot{\theta} \quad (9)$$

式中: $\Delta \dot{\theta}$ 为PI模块的输出。

功率角 δ 稳定在一个恒定值使得 $P=P_{set}$,这种工作模式称为P模式。当开关 S_P 断开时,PI模块退出,VSG以频率下垂的方式运行,这种工作模式称为 P_D 模式,此时 $P \neq P_{set}$,频率下垂系数定义如下:

$$D_p = -\Delta T / \Delta \dot{\theta} \quad (10)$$

其中

$$\Delta \dot{\theta} = \dot{\theta} - \dot{\theta}_n$$

式中: ΔT 为频率下垂模块 D_p 的输出; $\Delta \dot{\theta}$ 为VSG与标称频率的频率偏差,也是频率下垂块的输入(因为开关 S_P 为断开状态)。

这将VSG频率恢复为

$$\dot{\theta} = \dot{\theta}_n + \Delta \dot{\theta} \quad (11)$$

式(11)与式(7)在形式上相同,但具有不同的频率偏差。实际上,当功率角 δ 小于 $\pi/2$ 时,在2种情况下 $\dot{\theta}$ 均收敛于电网频率 $\dot{\theta}_g$,具体分析如下:考虑到频率环的时间常数 $\tau_f = J/D_p$ 远小于电压环的时间常数。因此,涉及频率环动态时,可假设 $M_i i_r$ 为常数。此外,根据式(5),由VSG输出的实际功率与 $\sin \delta$ 成正比。故电磁转矩 T_e 也和 $\sin \delta$ 成正比。对于 $\delta \in (-\pi/2, \pi/2)$,当功率角 δ 增加时 T_e 增加,而当功率角 δ 减小时 T_e 减小。如果电网频

率减小,那么功率角 δ 和电磁转矩 T_c 增加。从而图4中的积分模块 $1/(Js)$ 的输入减小并且VSG频率减小。这个过程一直持续到 $\dot{\theta} = \dot{\theta}_g$ 。如果电网频率增加,则过程类似直到 $\dot{\theta} = \dot{\theta}_g$ 。因此,当 $\delta \in (-\pi/2, \pi/2)$ 时,VSG频率将自动收敛于电网频率,且无需PLL。

图4中自同步VSG控制器保留了无功功率控制回路,增加的开关 S_Q 可选择或删除电压下垂功能。当 S_Q 断开时, $M_i i_i$ 由增益为 $1/K$ 的积分器在 Q_{set} 和 Q 之间的跟踪误差产生,故无论 U_n 和 U_g 之间的电压差如何, Q 都将无静差跟踪 Q_{set} ,这种工作模式称为Q模式。当 S_Q 闭合时,电压下垂接入, U_n 和 U_g 之间的电压差被考虑到控制器中,这种工作模式称为 Q_D 模式,此时 $Q \neq Q_{set}$,电压下垂系数定义如下:

$$D_q = -\Delta Q / \Delta U \quad (12)$$

式中: ΔQ 为无功功率误差; ΔU 为 U_n 和 U_g 之间的电压差; D_q 为电压下垂系数。

2.4 自同步VSG并网前的运行

在VSG并网前,输出电压幅值 E 需等于电网电压幅值 U_g ,并且相序和相位也必须相同。传统同步发电机需要使用同步装置来测量相位差,并调整机械转矩进行同步。并网逆变器则使用PLL来测量相位,使逆变器产生的电压与电网电压锁定。如前所述,图4所示的控制器能够在自同步模式下控制VSG,此时 $P_{set} = Q_{set} = 0$ 。因此,当VSG并入电网时, $E = U_g, \theta = \theta_g$ 可得到满足。为了模拟将VSG并入到电网的过程,引入虚拟电感 L 和电阻 R ,所得到用于反馈的电流 i_s 如下式所示:

$$i_s = \frac{1}{Ls + R} (e - u_g) \quad (13)$$

用 i_s 替换电网电流 i_g 进行反馈,使得 T_c 和 Q 可根据式(2)和式(4)计算。这允许VSG在P模式、Q模式下运行,且 $P_{set} = Q_{set} = 0$,即VSG电压与电网电压同步。此时和真正并网的区别仅在于是虚拟电流而不是电网电流通过开关 S_c 馈送到控制器。由于电流并非真实存在,故虚拟电感 L 和电阻 R 可在很宽的范围内选择。 L 和 R 取较小值可加速VSG同步过程。然而,太小的虚拟电感 L 和电阻 R 可能导致频率振荡。通常, L 和 R 选择为略小于真实的 L_s 和 R_s 的值。此外, L/R 定义了滤波器 $1/(sL+R)$ 的截止频率,也即确定了滤除电网电压 u_g 中的谐波的能力。当虚拟电流被控制为零时,VSG与电网同步。然后,可闭环断路器将

VSG并网。断路器闭合时,应将开关 S_c 转到位置2,以将 i_g 送入控制器进行正常运行。在VSG并入电网之后,可以断开或闭合开关 S_p 和 S_Q ,以实现表1中所示的各种运行模式。

3 仿真分析

为验证自同步VSG设计,在Matlab/Simulink中搭建仿真模型进行仿真验证,求解器为ode23,最大步长0.1 ms。仿真系统参数为:额定容量 $S_n = 100 \text{ V} \cdot \text{A}$,额定电压 $U_n = 16.968 \text{ V}$,额定频率 $f_n = 50 \text{ Hz}$,直流电压 $U_{DC} = 42 \text{ V}$,并网电感 $L_g = 0.15 \text{ mH}$,并网电阻 $R_g = 0.045 \Omega$,滤波电感 $L_s = 0.45 \text{ mH}$,滤波电容 $C = 22 \mu\text{F}$,滤波电阻 $R_s = 0.135 \Omega$,虚拟电感 $L = 0.2 \text{ mH}$,虚拟电阻 $R = 0.05 \Omega$,比例参数 $K_p = 0.5$,积分参数 $K_i = 20$ 。仿真中频率下垂参数 D_p 设置为0.202 6,使频率从标称频率 f_n 下降0.5%所对应功率增加为额定值的100%。同时设置电压下垂参数 D_q 为117.88,即电压下降5%对应增加100%的无功功率。频率下垂时间常数 $\tau_f = 0.002 \text{ s}$,电压下垂时间常数 $\tau_u = 0.02 \text{ s}$ 。

在 $t=0 \text{ s}$ 时开始仿真,开关 S_c 处于位置1, S_p 闭合, S_Q 断开,主回路断路器断开,VSG处于自同步模式,同时 $P_{set} = Q_{set} = 0$ 。电网电压设定为比标称值高2%,VSG迅速与电网同步。在 $t=2 \text{ s}$ 时,主回路断路器闭合,开关 S_c 切换到位置2。在 $t=5 \text{ s}$ 时, P_{set} 改为80 W,在 $t=10 \text{ s}$ 时, Q_{set} 改为60 var。在 $t=15 \text{ s}$ 时,电网频率逐步升高到 $f = 50.1 \text{ Hz}$,即增加0.2%。在 $t=20 \text{ s}$ 时,通过关闭 S_p 启动VSG的 P_D 模式,并在 $t=25 \text{ s}$ 时,通过闭合 S_Q 启动VSG的 Q_D 模式。在 $t=30 \text{ s}$ 时,电网频率变回50 Hz,并且在 $t=35 \text{ s}$ 时,仿真结束。系统仿真波形如图5所示。

仿真中虚拟电流和实际电流之间的切换过渡非常平滑, P 和 Q 在并网前后保持为零。在VSG并网后,无论 P_{set} 和 Q_{set} 如何设置,以及运行模式如何,VSG均能很好地跟踪电网频率,无需使用PLL。

同时,自同步VSG控制方案保留了原VSG控制的优良特性,系统在P模式、Q模式下的响应合理,具有较小的过冲和零稳态误差。当 P_D 模式启用且频率增加到 $f_g = 50.1 \text{ Hz}$ 时,实际功率下降40 W,即标称值的40%,因为此时 f_g 比标称频率 f_n 高2%。当 f_g 返回到标称频率时,功率迅速回到设定值。类似地,当启用 Q_D 模式时,无功功率也下降40 var,也即标称值的40%,因为

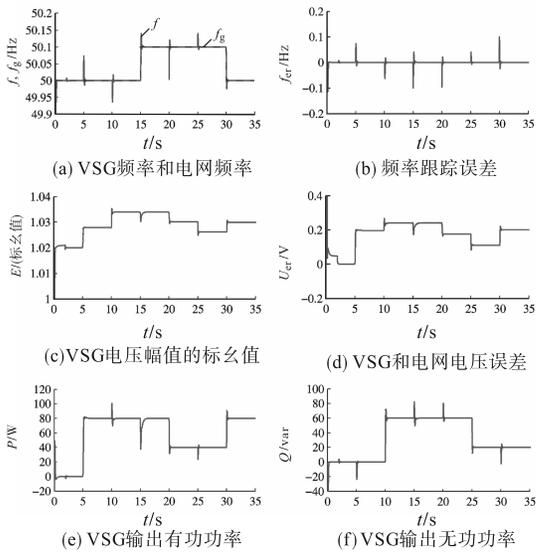


图5 正常运行下的仿真结果

Fig.5 Simulation results under normal operation

电网电压 u_g 比标称值 U_n 高2%。以 b 相为例, VSG 输出电压 u 和电网电压 u_g 在并网前后的波形以及差异如图6所示。从图6中可看出,并网前峰峰值约为100 mV,其值较小,并入到电网是没有问题的。

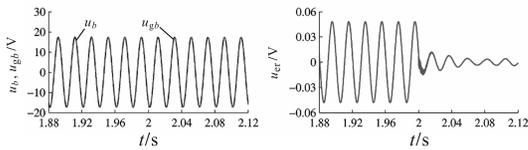


图6 并网前后的电压仿真结果

Fig.6 Simulation results of the voltages before and after grid connection

为了证明自同步VSG的动态性能,电网频率 f_g 在 $t=15$ s时增加0.1 Hz,并在 $t=30$ s时恢复正常,系统响应如图7所示。

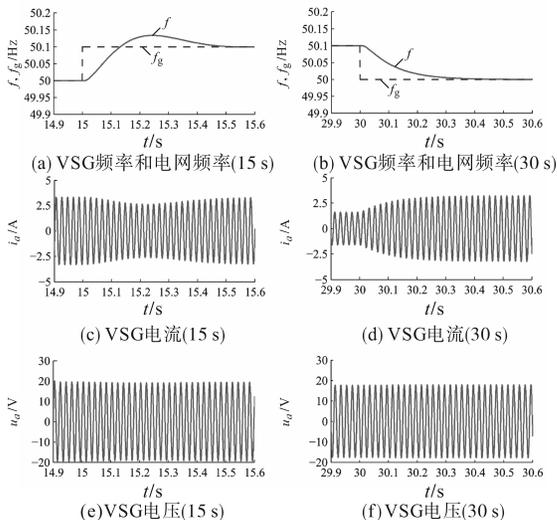


图7 频率动态仿真结果

Fig.7 Simulation results of the frequency dynamic

需注意的是,前一种仿真工况是由PI调节器生成参考频率 θ_r ,因为 S_p 是闭合的,但后一种情况下, S_p 是断开的,故PI调节器未被激活。这将导致不同的响应速度。此外,由于2种工况下VSG的工作模式不同,电流变化的幅度不同,但是电压均无显著变化。

4 实验验证

对所提出的自同步VSG进行了小功率系统实验测试,实验参数同仿真。实验中采样频率和开关频率分别设置为5 kHz和15 kHz。实验过程为:1)先关闭所有IGBT,开关 S_c 切换到位置1, S_p 闭合, S_q 断开,设置 $P_{set}=Q_{set}=0$,启动系统运行在自同步模式;2)约在 $t=5$ s时,开始投入IGBT工作;3)约在 $t=10$ s时,闭合主回路断路器,同时将 S_c 切换到位置2;4)分别在 $t=20$ s和 $t=30$ s时,设置 $P_{set}=60$ W, $Q_{set}=20$ var;5)分别在 $t=40$ s和 $t=50$ s时,断开 S_p 启用 P_D 模式和闭合 S_q 启用 Q_D 模式;6)在 $t=60$ s时停止数据采集,实验结束。共进行了2组实验,分别为电网频率低于和高于50 Hz。

实验结果如图8所示。图8中,左、右栏分别为当电网频率低于、高于50 Hz时系统的响应图。从图8a~图8d中可以看出,VSG在并网前能较好地跟踪电网频率,频率峰峰值纹波小于0.006 Hz,对比PLL得到的电网频率存在0.035 Hz的频率峰峰值纹波,故新方案显著改善了频率跟踪性能。此后的频率动态中,即在运行条件改变时,对应VSG的虚拟转速变化时,频率出现瞬态响应,但很快就稳定下来,峰峰值波动约为0.011 Hz,时间小于0.5 s,频率响应平滑并仍很好地实现了频率跟踪。VSG并网后的频率峰峰值纹波增大1倍,但仍3倍好于PLL锁相频率。从图8e~图8h中可看出,在 $t=20$ s前, U_g 约为 U_n 的98%。 Q_{set} 被选择为小于20 var,因此在 Q_D 模式中,VSG不会产生可能导致过电流的过多无功功率,从而无功功率响应平稳。当 Q_D 模式启用时,无功功率增加了约40 var,如预期的那样,因为 U_g 较低,如图8i、图8j所示。值得注意的是,图8k、图8l所示的有功功率是从VSG输出到电网的实际功率,比设定值略小,这是因为电感的寄生电阻存在一定损耗。当 P_D 模式启用后,有功功率立即增加到新的稳定值,这也是随着电网频率的变化而变化的。

对比图8左、右栏波形可看出,在启用下垂模

式之前,系统响应无太大差异,VSG频率跟踪良好,功率实际值也平滑过渡到设定值,超调量较小。但启用 P_D 模式后,有功功率迅速升高或降低并达到新的稳态,这和预期保持了一致,同时当电网频率高于50 Hz时,电网电压幅值 U_g 略小于当电网频率低于50 Hz的情况,只约为额定值 U_n 的97.5%。因此,当 Q_D 模式在大约50 s时启用时,产生的无功功率较电网频率低时增加约50 var。

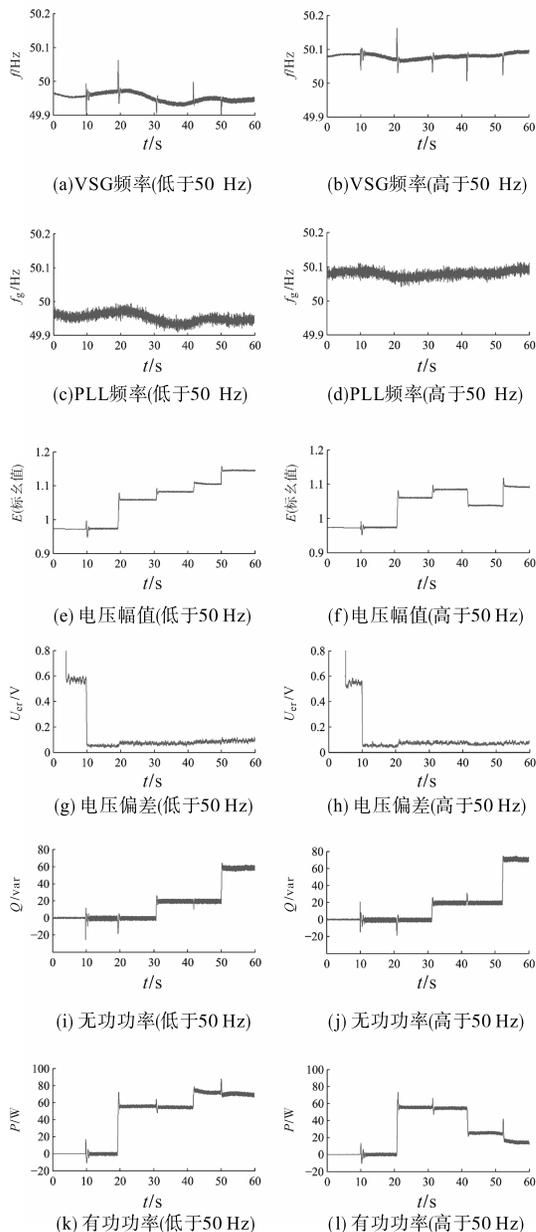


图8 实验结果

Fig.8 Experimental results

5 结论

为了提高VSG的控制性能,提出了一种无PLL的自同步VSG控制器,通过理论设计、仿真

和实验,可得到结论如下:1)自同步VSG方案中不需要专用的PLL跟踪电网频率,简化了控制器,降低了控制器计算负担,提高了软件可靠性,同时还减少了系统非线性因素,降低了控制器设计难度,减少了开发成本;2)相对于其他不含PLL的同步方案,新型自同步方案不改变原VSG控制器架构,无新增计算单元,在保证同步速度和精度的基础上,计算负担小;3)通过设置2路选择开关,新型自同步VSG控制器方案可在并网前同步电网频率,并在并网后自动跟踪电网频率,实验结果表明,自同步方案性能优于常规PLL方案,即频率跟踪性能显著提高;4)基于本文思路,原则上控制器具有同步能力的,均可设计出移除PLL的方法。

参考文献

- [1] 陈新,王赞程,龚春英,等.采用阻抗分析方法的并网逆变器稳定性研究综述[J].中国电机工程学报,2018,38(7):2082-2094.
- [2] 陈秉乾,庄圣贤.基于虚拟同步机的微网逆变器并网技术研究[J].电力电子技术,2017,51(3):39-42.
- [3] 颜湘武,贾焦心,王德胜,等.虚拟同步发电机的并网功率控制及模式平滑切换[J].电力系统自动化,2018,42(9):91-99.
- [4] 孙大卫,刘辉,高舜安,等.电流控制型虚拟同步发电机的小信号建模与稳定性分析[J].电网技术,2018,42(9):2983-2991.
- [5] 薛冰,杨旭红,张苏捷,等.不平衡电压下的虚拟同步发电机控制方法[J].电气传动,2018,48(4):61-64.
- [6] 张晓滨,黄佳敏,伍文俊,等.弱电网条件下的有源电力滤波器无锁相环控制[J].电气传动,2019,49(2):16-22.
- [7] 赵红雁,郑琼林,李艳,等.应用于三相并网系统的电网电压快速锁相技术研究[J].高电压技术,2018,44(1):314-320.
- [8] 盘宏斌,龙海鸿,朱茂琨,等.基于Hilbert变换和预设旋转频率的无锁相环电网同步基准正弦信号检测方法[J].电工技术学报,2018,33(10):2345-2353.
- [9] Harnefors L, Bongiorno M, Lundberg S. Input-admittance Calculation and Shaping for Controlled Voltage-source Converters[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2007, 54(6):3323-3334.
- [10] 曾正,邵伟华,刘清阳,等.并网逆变器数字锁相环的数学物理本质分析[J].电工技术学报,2018,33(4):808-816.
- [11] Silva C H D, Pereira R R, Silva L E B D, et al. A Digital PLL Scheme for Three-phase System Using Modified Synchronous Reference Frame[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2010, 57(11):3814-3821.

收稿日期:2019-05-14

修改稿日期:2019-08-05