

DOI: 10.13234/j.issn.2095-2805.2024.1.57

中图分类号: TM76

文献标志码: A

# 多微型逆变器微电网频率暂态稳定 综合控制研究

李庆军<sup>1</sup>, 邵建豪<sup>2</sup>, 范越<sup>1</sup>, 崔章顺<sup>3</sup>

(1. 国网青海省电力公司建设部, 西宁 810008; 2. 河南财经政法大学资源与环境学院, 郑州 450000;  
3. 北京洛斯达科技发展有限公司西北分公司, 北京 100120)

**摘要:** 研究多微型逆变器微电网频率暂态稳定综合控制, 有效控制微电网频率暂态稳定性, 提升控制准确性, 缩短调节时间。通过励磁控制与功频控制构建虚拟同步发电机控制方法, 实现负荷小扰动下微电网频率暂态稳定控制; 利用改进下垂控制方法, 实现负荷大扰动下微电网频率暂态稳定控制; 通过设计同步电压控制器与双环控制器, 完成虚拟同步发电机控制方法与改进下垂控制方法的自由切换, 综合控制不同情况下微电网频率的暂态稳定。实验证明, 所研究方法在不同负荷扰动下, 可有效实现微电网频率暂态稳定控制; 在切换离网模式与并网模式时, 能够有效切换控制方法, 准确控制微电网频率暂态稳定性, 缩短调节时间。

**关键词:** 多微型逆变器; 微电网; 频率; 暂态稳定; 综合控制; 虚拟同步发电机; 改进下垂控制

## Study on Integrated Control of Frequency Transient Stability of Multi-microinverter Microgrid

LI Qingjun<sup>1</sup>, TAI Jianhao<sup>2</sup>, FAN Yue<sup>1</sup>, CUI Zhangshun<sup>3</sup>

(1. Construction Department, State Grid Qinghai Electric Power Company, Xining 810008, China; 2. College of Resources and Environment, Henan University of Economics and Law, Zhengzhou 450000, China; 3. Northwest Branch, Beijing Lostar Science and Technology Development Co., Ltd, Beijing 100120, China)

**Abstract:** The integrated control of frequency transient stability of multi-microinverter microgrid is studied, which can effectively control the frequency transient stability of microgrid, improve the control accuracy, and shorten the regulation time. By means of excitation control and power frequency control, a virtual synchronous generator(VSG) control method is constructed to realize the frequency transient stability control of microgrid under a small load disturbance. The improved droop control method is used to realize the frequency transient stability control of microgrid under a large load disturbance. By designing a synchronous voltage controller and a double-loop controller, the free switch between the VSG control method and the improved droop control method is completed, and the transient stability of microgrid frequency under different conditions is controlled comprehensively. Experimental results show that the proposed method can effectively control the frequency transient stability of microgrid under different load disturbances. When switching between the off-grid and grid-connected modes, the control methods are effectively switched, the frequency transient stability of microgrid is accurately controlled, and the regulation time is shortened.

**Keywords:** Multi-microinverter; microgrid; frequency; transient stability; integrated control; virtual synchronous generator(VSG); improved droop control

收稿日期: 2020-10-21; 修回日期: 2021-01-11, 2021-02-26;

录用日期: 2021-03-04; 网络首发日期: 2021-08-20

基金项目: 河南省重点研发与推广专项(科技攻关)资助项目  
(192102210138)

This work is supported by the Key R & D and Promotion Special  
(Scientific and Technological Breakthrough) Project of Henan  
Province under the grant 192102210138

微电网属于分布式电源、能量转换装置、储能装置与有关保护装置等组成的小型发配电系统, 可以满足小范围内用户的供电需求, 其控制方式比较灵活, 能够独立运行, 还能够并入电网运行<sup>[1]</sup>。微电网的优点是能够利用风能与光能等绿色环保的可

再生能源,解决化石能源缺少的能源危机;微电网属于大电网的辅助,在大电网出现故障的情况下,微电网以确保本地负载正常供电为基础,为大电网输送功率,增强电网运行的可靠性与安全性<sup>[2]</sup>;改变传统电网的远距离输电方式,减少输电线路的损耗,节约检修维护成本,提升输电效率;具有即插即用的灵活控制方式;满足用户多样化的需求<sup>[3]</sup>。微电网中分布式电源的种类与数量逐渐增多,其规模和容量也随之扩大,增加了系统的繁琐程度,导致微电网出现暂态情况,造成系统运行的不稳定<sup>[4]</sup>。微电网运行稳定性的关键因素是暂态稳定性控制<sup>[5]</sup>。

同步发电机具有较好的惯性特征和阻尼特征,能够依据同步发电机自身动能与电网实施能量转换,提升电网运行的稳定性。通过模拟同步发电机的运行特征研究虚拟同步发电机 VSG (virtual synchronous generator) 技术,使微型逆变器存在和同步发电机一致的转动惯量和阻尼特征,提升微电网的动态性能。VSG 技术在负荷大扰动情况下,微电网仍会出现暂态不稳的现象,从而导致微电网运行振荡,损害微电网中的用电设备,为所连大电网带来不利因素。针对这个问题,研究多微型逆变器微电网频率暂态稳定综合控制,提升微电网运行的暂态稳定性。

## 1 多微型逆变器微电网频率暂态稳定综合控制方法

### 1.1 虚拟同步发电机技术

在多微型逆变器中应用虚拟同步发电机技术,可以使多微型逆变器模拟同步发电机的频率与电压输出等特征。VSG 技术由励磁控制器与功频控制器组成。

#### 1.1.1 励磁控制

VSG 内的励磁控制器原理与传统同步发电机一致,如图 1 所示。

调差指合理分配每个 VSG 并联运行过程中的无功负荷, $U_{ref}$  为 VSG 的电压参考值, $\Delta U$  为电压变化量, $U_c$  为调差电压, $Q_{ref}$  为无功功率参考值, $Q$  为

实际输出的无功功率。调节比例积分指调节多微型逆变器微电网的输出电压, $U_0$  为 VSG 输出电压,在无功负载突变情况下,采用励磁控制器调节,使多微型逆变器微电网保持一个新的电压水平  $U_i$ 。

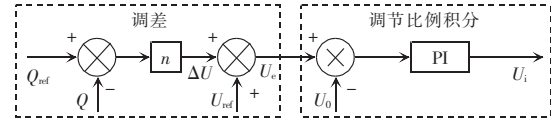


图 1 励磁控制器原理

Fig. 1 Schematic of excitation controller

#### 1.1.2 功频控制

VSG 的转子运动方程为

$$\begin{cases} B \frac{d\Delta w}{dt} = P_{ref} - P_e - D\Delta w \\ \Delta w = w - w_{ref} \\ \frac{d\delta}{dt} = w \end{cases} \quad (1)$$

式中: $B$  为同步发电机的转动惯量; $w_{ref}$  为多微型逆变器微电网同步角速度参考值; $w$  为实际角速度; $P_{ref}$  为有功功率参考值; $P_e$  为输出有功功率; $D$  为阻尼系数; $\delta$  为发电机功角。

实际角速度  $w$  和实际频率  $f$  间的关系是  $w = 2\pi f$ , 频率变化率可表示为

$$f - f_{ref} = -\frac{1}{4\pi^2 D f_{ref} + 2\pi k_w} (P_e - P_{ref}) \quad (2)$$

式中: $f_{ref}$  为频率参考值; $k_w$  为两个频率测量之间经过的时间。

根据式(1)与式(2)可知,在 VSG 功频控制方程内加入转动惯量,能够模拟同步发电机的转子惯性,在出现小扰动负荷时,VSG 输出频率基本没有变化,能够提升多微型逆变器微电网频率暂态稳定性<sup>[6]</sup>。

#### 1.2 改进下垂控制方法

在大负荷扰动时,通过改进的曲线型下垂控制方法与综合切换控制策略,确保多微型逆变器微电网有功出力正常与频率暂态稳定<sup>[7]</sup>。在大负荷扰动导致频率严重偏移的情况下,从 VSG 控制方法转换为曲线型的改进下垂控制方法,确保多微型逆变器微电网既能正常输出功率,又能保持电压频率暂态稳定<sup>[8]</sup>。

改进下垂控制方法的有功-频率函数 $f(P_{ref})$ 需要符合两个条件:确保 2 种方法的连接点处是连续可导的;频率控制在安全范围中,始终大于最低频率 $f_{min}$ 。

通过式(2)获取 VSG 控制方法在切换点处的频率变化率,结合上述两个条件,设置指数函数为

$$f(P_{ref}) = a^{(P_{ref}-b)} + f_{min} \quad a \in (0,1) \quad (3)$$

式中, $a$ 与 $b$ 为常数,通过满足切换点 $(P_s, f_s)$ 同时出现在两种控制方法的函数曲线上以及切换点处 VSG 控制方法和改进下垂控制方法的频率变化相同两个条件,获取常数 $a$ 与 $b$ 的值。根据式(3)可知,利用改进下垂控制方法控制后,因为存在指数函数,所以输出功率与频率降低的变化率成反比,且频率一直大于 $f_{min}$ ,能够保持多微型逆变器微电网频率暂态稳定<sup>[9]</sup>。利用 VSG 控制方法的情况下,在频率接近 $f_{min}$ 时,需更换控制方法,此时相应的输出功率是 $P_s$ ,即

$$P_s = P_e + j[U(t)I(t)] \quad (4)$$

式中: $P_s$ 为输出功率参考值; $P_e$ 为输出有功功率; $j$ 为系统参数; $U(t)$ 为瞬时电压; $I(t)$ 为瞬时电流。由于 $j$ 是个变量,因此当 $j$ 发生变化时, $P_s$ 也会随之改变,两者呈正比例关系。

改进下垂控制的无功(电压)控制器与 VSG 的励磁控制器原理一致,有效降低两种控制方法生成参考信号幅值的差别,不会造成参考电压幅值的突变<sup>[10]</sup>。

### 1.3 综合控制

当多微型逆变器微电网频率未超出正常范围时,通过 VSG 控制方法,可确保输出功率和电压频率的暂态稳定。若出现小扰动负荷,VSG 控制方法能够确保多微型逆变器微电网频率稳定地过渡到新的稳定点;若出现大扰动负荷,多微型逆变器微电网频率开始偏移且偏移情况较重,需要将 VSG 控制方法变换成改进下垂控制方法,既能确保输出功率正常,又能保证频率快速恢复到正常范围<sup>[11]</sup>,使多其安全稳定运行得到保障<sup>[12]</sup>。图 2 为多微型逆变器微电网频率暂态稳定综合控制原理,图中: $i_{abc}$ 为 VSG 的输入电流; $U_{abc}$ 为 VSG 的输入电压。

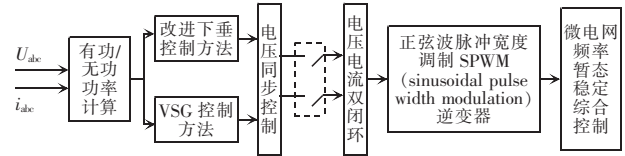


图 2 综合控制原理

Fig. 2 Schematic of integrated control

#### 1.3.1 VSG 方法与改进下垂方法电压同步控制

在大扰动负荷时,多微型逆变器微电网的输出有功功率大于设置的 $P_s$ 的情况下,多微型逆变器从 VSG 控制方法切换成改进下垂控制方法,两种控制方法在输出功率均为 $P_e$ 时,获取的电压幅值、频率与相位并不相同,此时更改控制方法,多微型逆变器输出电压会出现畸变,不能保证其稳定运行<sup>[13]</sup>,这就需要在更换控制方法前,同步控制输出电压。由 VSG 控制方法更换成改进下垂控制方法的电压同步控制器 1 如图 3 所示。

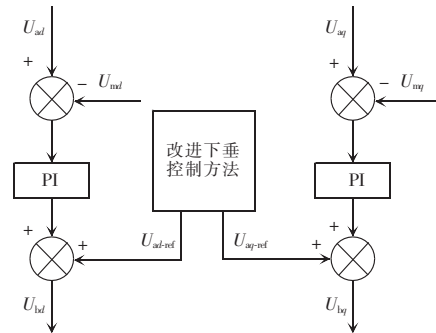


图 3 电压同步控制器 1

Fig. 3 Voltage synchronization controller 1

通过 dq 坐标旋转变换 VSG 控制方法的输出电压,由直流分量 $U_{ad}$ 与 $U_{aq}$ 代表交流电压 $U$ ,并未直接调节电压与频率,利于实施线性 PI 控制电压与频率,避免造成多微型逆变器微电网的动荡。比较 $U_{ad}$ 、 $U_{aq}$ 和多微型逆变器微电网母线电压的 dq 轴分量 $U_{md}$ 、 $U_{mq}$ ,由 PI 控制调节偏差,将调节后的偏差分别和改进下垂控制方法输出信号的 dq 轴分量 $U_{ad-ref}$ 与 $U_{aq-ref}$ 相加,获取最终控制信号 $U_{d-ref}$ 与 $U_{q-ref}$ ,将其当作电压电流双环控制的输入。

图 4 中 VSG 控制方法输出电压的 dq 轴分量为 $U_{ad-ref}$ 与 $U_{aq-ref}$ 。由改进下垂控制方法更换成 VSG 控制方法的过程中,同样需采用电压同步控制器避免电压畸变,如图 4 所示。

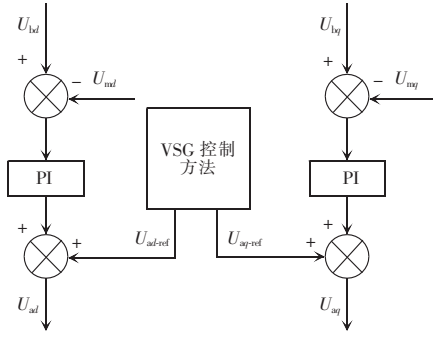


图 4 电压同步控制器 2

Fig. 4 Voltage synchronization controller 2

### 1.3.2 VSG 方法与改进下垂方法双环控制

双环控制器既能缓冲上层功率控制器输出的控制信号,又能提升多微型逆变器微电网输出的电能质量,还能抑制更换控制方法过程中形成的暂态振荡<sup>[14]</sup>。双环控制器的外环通过 PI 控制准确控制输出电压,内环通过比例控制准确控制电流,由电压外环电流内环构成双环控制器。内环电流的反馈用滤波器的电容电流  $i_c$  表示,以便实现电容电流的快速调节,确保通过电容电流微分获取的输出电压也能迅速调整,双环控制器原理如图 5 所示。

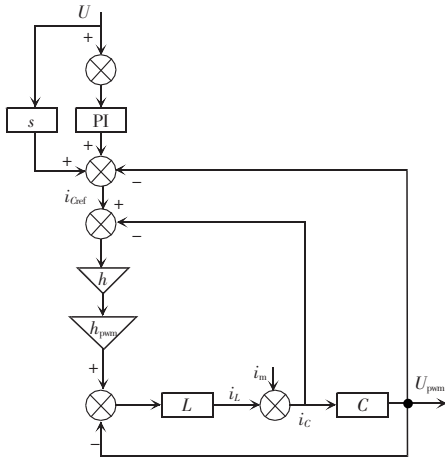


图 5 双环控制器原理

Fig. 5 Schematic of double-loop controller

图 5 中: $U$  为功率外环输入的参考电压; $C$  为滤波器电容; $L$  为滤波器电感; $i_{cref}$  为电流内环控制的输入电流参考值; $h$  为电流内环控制的增益系数; $h_{pwm}$  为多微型逆变器接口传递函数; $i_l$  为电感电流; $s$  为多微型逆变器微电网电流; $i_m$  为电容电流; $i_c$  为输出的控制信号; $U_{pwm}$  为输出电压。

以  $U$  为输入电压, $U_{pwm}$  为输出电压,获取电压外环传递函数公式为

$$U = \frac{hh_{pwm}Cs^2 + hh_{pwm}h_{up}s + hh_{pwm}h_{ui}}{LCs^3 + hh_{pwm}Cs^2 + (1 + hh_{pwm}h_{up})s + hh_{pwm}h_{ui}} U_{pwm} - \frac{Ls^2}{LCs^3 + hh_{pwm}Cs^2 + (1 + hh_{pwm}h_{up})s + hh_{pwm}h_{ui}} i_m \quad (5)$$

式中, $h_{up}$  和  $h_{ui}$  为 PI 控制器的传递函数。

电压外环比例增益函数公式为

$$Y_u(s) = \frac{hh_{pwm}Cs^2 + hh_{pwm}h_{up}s + hh_{pwm}h_{ui}}{LCs^3 + hh_{pwm}Cs^2 + (1 + hh_{pwm}h_{up})s + hh_{pwm}h_{ui}} \quad (6)$$

以  $i_{cref}$  为输入电流, $i_c$  为输出电流,获取电流内环的传递函数公式为

$$i_c = \frac{hh_{pwm}Cs}{LCs^3 + hh_{pwm}Cs + 1} i_{cref} - \frac{Ls^2}{LCs^2 + hh_{pwm}Cs + 1} i_m \quad (7)$$

电流内环比例增益函数公式为

$$Y_i(s) = \frac{hh_{pwm}Cs}{LCs^2 + hh_{pwm}Cs + 1} \quad (8)$$

多微型逆变器的等效输出阻抗公式为

$$Z(s) = \frac{Ls^2}{LCs^3 + hh_{pwm}Cs^2 + (1 + hh_{pwm}h_{up})s + hh_{pwm}h_{ui}} \quad (9)$$

电压外环电流内环双环控制的优点是稳定性高与响应速度快等。虽然电压与电流反馈回路的增益函数高,但是稳定性和增益函数没有形成冲突,确保了输出电压的高精度<sup>[15]</sup>。

在工程实际中,为了保障供电的安全性和可靠性,微网储能系统需要在并网与离网之间进行切换,为了保证系统平稳切换,需要在公共连接点处加装断路器开关,通过给系统加入断路器控制模块,来实现平稳切换的稳定性。加装断路器切换控制模型如图 6 所示。

当断路器开关断开时,微电网系统与大电网的能量传输通道被切断,处于离网运行状态,同时双模式控制器控制其模式切换过程,使并网运行控制模式切换至离网运行控制模式;当断路器开关闭合时,微电网系统与大电网的能量传输通道导通,处

于并网运行模式,同时双模式控制器控制其模式切换过程,使离网运行控制模式切换至并网运行控制模式,最终实现本文系统在双模式转换状态下的平稳切换。基于上述过程,实现多微型逆变器微电网频率暂态稳定综合控制的策略流程如图 7 所示。

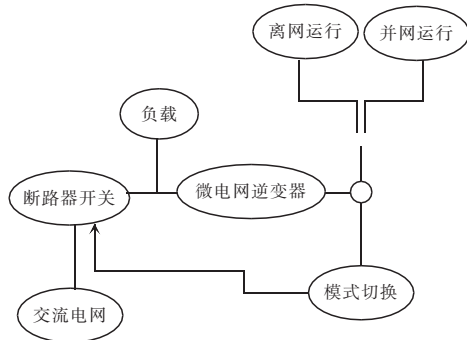


图 6 加装断路器切换控制模型

Fig. 6 Switching control model of additional circuit breaker

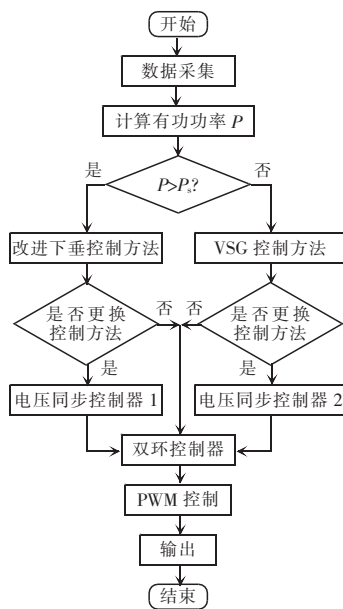


图 7 综合控制策略流程

Fig. 7 Flow chart of integrated control strategy

综合控制策略具体步骤如下。

**步骤 1** 采集多微型逆变器输出的三相侧电感电流  $i_{abc}$  与三相电容电压  $U_{abc}$ , 计算得到多微型逆变器微电网的输出功率  $P$ 。

**步骤 2** 比较输出功率  $P$  与设置的  $P_s$ , 选取控制方法。 $P \leq P_s$  时应用 VSG 控制方法;  $P > P_s$  时应用改进下垂控制方法。

**步骤 3** 决定是否更换控制方法, 不更换控制方法时, 电压同步控制器不需工作; 将 VSG 控制方法更换成改进下垂控制方法时, 运用电压同步控制器 1; 将改进下垂控制方法更换成 VSG 控制方法时, 运用电压同步控制器 2。

**步骤 4** 由双环控制器整理控制信号, 输出电压信号, 传入脉宽调制 PWM (pulse width modulation) 控制器, 形成 PWM 控制信号。

**步骤 5** 输出控制信号, 完成多微型逆变器微电网频率暂态稳定。

## 2 实验分析

在 PSCAD 仿真环境中搭建存在 2 个微型逆变器的微电网模型, 微型逆变器 1 属于储能蓄电池, 当作微电网主电源, 微型逆变器 2 属于光伏源, 当作微电网从电源, 通过调节负荷, 验证本文方法的有效性与准确性。2 个微型逆变器的微电网模型如图 8 所示, 具体参数如表 1 所示。

其中, 固定负荷有功功率是 20 kW, 无功功率是 0; 调节负荷 1 有功功率是 6 kW, 无功功率是 0; 调节负荷 2 有功功率是 9 kW, 无功功率是 0; 调节负荷 3 有功功率是 5 kW, 无功功率是 0; 未增加光照强度时微型逆变器 2 的最大输出功率是 5 kW, 增加光照强度后, 最大输出功率是 10 kW。本文方法的改进下垂控制方法在  $P_s=28$  kW 时, 频率偏移严重, 最低频率为 41 Hz。

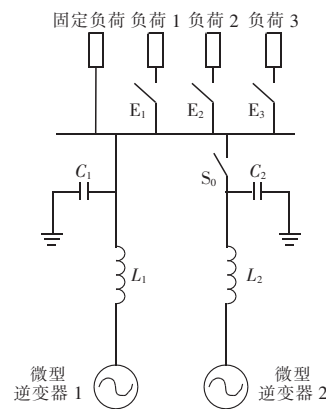


图 8 微电网模型

Fig. 8 Microgrid model

表 1 模型参数

Tab. 1 Model parameters

参数	微型逆变器 1	微型逆变器 2
额定有功功率/kW	20	20
额定无功功率/kW	0	0
滤波电容 $C/\mu\text{F}$	1 400	20
滤波电感 $L/\text{mH}$	0.9	0.7
角速度参考值 $w_{\text{ref}}/(\text{rad}\cdot\text{s}^{-1})$	325	325
调差系数	80	55
阻尼系数 $D/(\text{Nms}\cdot\text{rad}^{-1})$	6	6
基准电压/V	322	322
转动惯量 $B/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-2})$	0.6	0.6

### 2.1 调节负荷时控制方法有效性分析

仿真设置,第 1 步关闭  $E_3$ ,使微型逆变器按照额定功率运行;第 2 步在 0.6 s 时,关闭  $E_1$ ,加入负荷 1;第 3 步在 1.2 s 时,关闭  $E_2$ ,加入负荷 2;第 4 步在 2.1 s 时,增加微型逆变器 2 输出功率。分别在离散与连续 2 种形式下进行仿真实验,利用本文方法与 VSG 方法的微电网有功功率控制结果如图 9 所示。

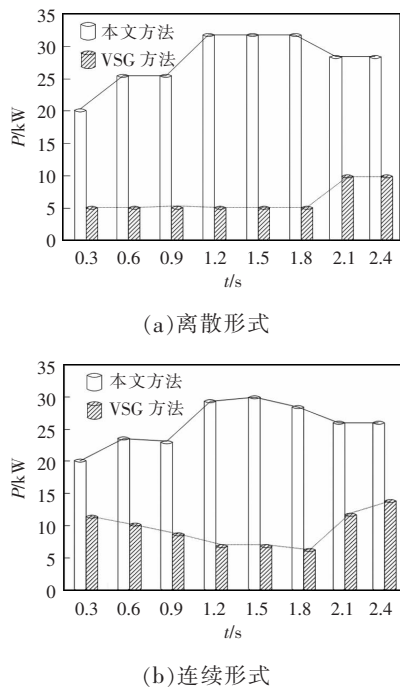


图 9 2 种方法输出有功功率

Fig. 9 Output active power based on two methods

根据图 9 可知,在 0.3 s 前微型逆变器 1 输出有功功率是 20 kW,在安全范围内运行;在 0.5 s 时

总负荷提升到 31 kW,微型逆变器 1 输出有功功率增加到 20 kW 以上,但低于设置点  $P_s$  的 28 kW,继续应用 VSG 控制方法;在 1.2 s 时总负荷提升到 40 kW,微型逆变器 1 输出有功功率增加到 30 kW 左右,高于设置点  $P_s$  的 28 kW,将 VSG 控制方法更换成改进下垂控制方法;在 2.1 s 时增加光照强度,微型逆变器 1 的输出有功功率降低到 28 kW,由改进下垂控制方法更换回 VSG 控制方法。

利用本文方法与 VSG 方法的微电网电压频率控制结果如图 10 所示。

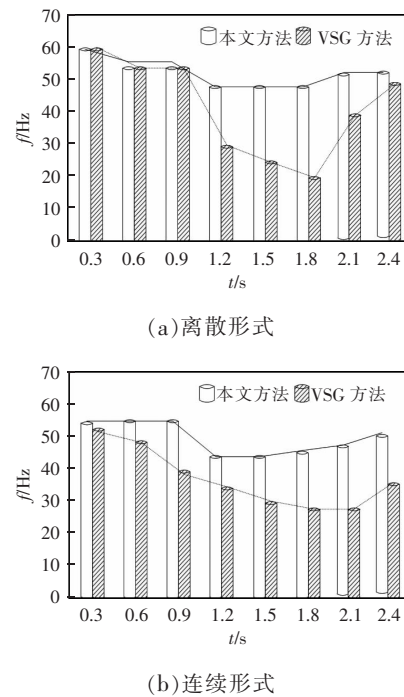


图 10 2 种方法微电网电压频率控制情况

Fig. 10 Voltage and frequency control of microgrid based on two methods

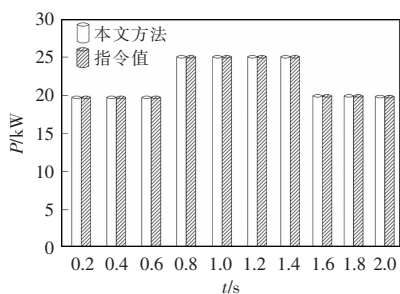
分析图 9 和图 10 可知,当微型逆变器 1 处于正常运行范围时,通过 VSG 控制方法维持微电网频率的暂态稳定,使频率维持在 55~60 Hz;当微型逆变器 1 输出的有功功率突增且小于  $P_s$  时,继续通过 VSG 控制方法维持微电网频率的暂态稳定,此时频率虽有小幅度偏移,但仍然维持在正常范围;当微型逆变器 1 输出功率大于  $P_s$  时,继续利用 VSG 控制方法会导致微电网频率出现大幅度偏移,降低至正常范围外,将 VSG 控制方法更换成改进下垂控制方法后,能够使微电网频率维持在 40 Hz

以上。实验证明,本文方法在不同情况下能够及时更换控制方法,有效控制多微型逆变器微电网频率的暂态稳定。

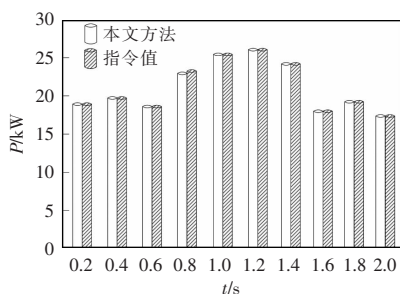
### 2.2 切换运行模式时控制方法准确性分析

以微型逆变器 1 为例,不加入任何负荷,验证本文方法在并网模式与离网模式切换时频率控制的准确性,设置仿真时长为 2 s,输出功率标准值设为指令值。在 0~0.8 s 期间,处于离网模式;在 0.8~1.4 s 期间,处于并网模式;在 1.4~2.0 s 期间,处于离网模式。图 11 为微型逆变器输出的有功功率与标准值的对比,图 12 为微电网频率变化曲线。

根据图 11 可知,在离网模式运行过程中,本文方法的输出功率和输出功率标准值基本一致;在并网模式运行过程中,本文方法的输出功率能够紧跟功率指令值,完成平滑过渡,缩短调节时间。



(a) 离散形式



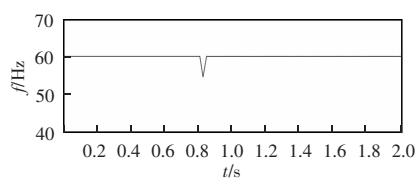
(b) 连续形式

图 11 输出有功功率与标准值对比

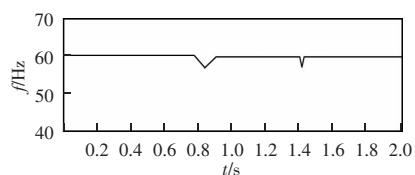
Fig. 11 Comparison between output active power and standard value

根据图 12 可知,在 0.8 s 时,由离网模式切换至并网模式,微电网频率在短时间内呈现下降的趋势,但依然处于正常范围之内,频率恢复到标准频率的时间较短;在 1.4 s 时,由并网模式切换至离网模式,离散形式情况下微电网频率未出现波动,连

续形式情况下出现微微波动,原因是本文方法能够针对不同输出功率自由切换控制方法,实现多微型逆变器微电网频率暂态稳定控制。实验证明,在切换离网与并网运行模式时,本文方法能够有效控制多微型逆变器微电网频率的暂态稳定,提升微电网频率暂态稳定控制的准确性,缩短调节时间。



(a) 离散形式



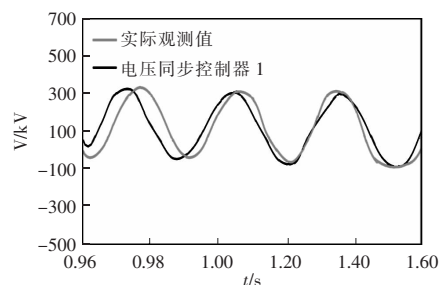
(b) 连续形式

图 12 微电网频率变化

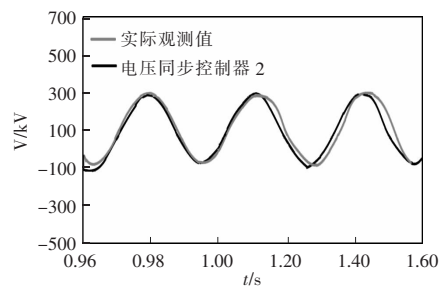
Fig. 12 Frequency variation of microgrid

### 2.3 电压同步控制器性能分析

根据本文设计的 2 种模式下的电压同步控制器 1 和 2,分别测试其对电压的控制效果,得出的仿真实验波形如图 13 所示。



(a) 电压同步控制器 1



(b) 电压同步控制器 2

图 13 电压波形

Fig. 13 Voltage waveforms

分析图 13 可知, 本文设计的电压同步控制器控制的稳态波形质量较高且波形平稳, 与实际观测值拟合程度较好, 有效避免了更换控制方法时输出电压出现畸变的情况, 控制能力较强。

### 3 结语

虚拟同步发电机使微型逆变器存在同步发电机的工作特征, 对微电网起到支撑作用, 增强微电网运行的稳定性, 结合虚拟同步发电机控制方法与改进下垂控制方法, 研究多微型逆变器微电网频率暂态稳定综合控制。所研究综合控制方法能够有效解决并、离网运行模式切换与多微型逆变器并联问题。以后还需深入研究微型逆变器直流侧分布式电源输出功率随机性与间歇性等特点, 抑制功率波动, 稳定微电网频率。对不同容量等级微型逆变器的并联优化策略与稳定性分析也可深入研究, 提升控制方法的应用范围。

#### 参考文献:

- [1] 刘洋, 王倩, 龚康, 等. 基于超导磁储能系统的微电网频率暂态稳定控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(15): 101-110.  
Liu Yang, Wang Qian, Gong Kang, et al. Transient stability control strategy of microgrid frequency based on SMES [J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(15): 101-110 (in Chinese).
- [2] 霍现旭, 黄鑫, 汪可友, 等. 基于虚拟同步机的微电网频率稳定控制研究[J]. 现代电力, 2019, 36(1): 49-56.  
Huo Xianxu, Huang Xin, Wang Keyou, et al. Research on frequency stability control for micro-grid based on virtual synchronous generator [J]. Modern Electric Power, 2019, 36(1): 49-56 (in Chinese).
- [3] 孙广宇, 李永丽, 靳伟, 等. 基于三相多功能逆变器的微电网电能质量综合治理策略[J]. 电网技术, 2019, 43(4): 1211-1219.  
Sun Guangyu, Li Yongli, Jin Wei, et al. A comprehensive power quality control strategy for microgrid based on three-phase multi-function inverters [J]. Power System Technology, 2019, 43(4): 1211-1219 (in Chinese).
- [4] 杨帆, 张辉, 王帆, 等. 微电网逆变器惯性电压下垂控制策略研究[J]. 电力电子技术, 2018, 52(12): 99-100.  
Yang Fan, Zhang Hui, Wang Fan, et al. Inertia voltage droop control strategy of micro grid inverter [J]. Power Electronics, 2018, 52(12): 99-100 (in Chinese).
- [5] 符杨, 黄丽莎, 赵晶晶. 基于风储协调控制的微电网平滑切换控制策略[J]. 电力系统及其自动化学报, 2017, 29(3): 55-61.  
Fu Yang, Huang Lisha, Zhao Jingjing, et al. Microgrid control strategy for smooth mode transfer based on coordination between double-fed induction generator and battery [J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2017, 29(3): 55-61 (in Chinese).
- [6] 黄振琳, 管霖, 陈兴望, 等. 多直流附加暂态稳定控制策略及其适应性研究[J]. 高电压技术, 2017, 43(4): 1175-1185.  
Huang Zhenlin, Guan Lin, Chen Xingwang, et al. Control strategy of multi-HVDC additional transient stability and its adaptability [J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(4): 1175-1185 (in Chinese).
- [7] 路小娟, 王新菊. 微电网并网逆变器 M-DPC 容错预测控制研究[J]. 控制工程, 2017, 24(3): 554-559.  
Lu Xiaojuan, Wang Xinju. Research on M-DPC fault tolerant predictive control of micro-grid grid-connected inverter [J]. Control Engineering of China, 2017, 24(3): 554-559 (in Chinese).
- [8] 李春兰, 任鹏, 王长云, 等. 微电网中蓄电池充放电非线性控制策略研究[J]. 农业工程学报, 2020, 36(8): 156-164.  
Li Chunlan, Ren Peng, Wang Changyun, et al. Nonlinear control strategy for battery charge and discharge in micro-grid [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36(8): 156-164 (in Chinese).
- [9] 李志华, 曾江, 黄骏翹, 等. 基于线性自抗扰控制的微网逆变器时-频电压控制策略[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(10): 145-154.  
Li Zhihua, Zeng Jiang, Huang Junchi, et al. Time-frequency voltage control strategy of microgrid inverter based on linear active disturbance rejection control [J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(10): 145-154 (in Chinese).
- [10] 张春雪, 黎灿兵, 冯伟, 等. 孤立运行光/储微电网中储能变流器暂态功率波动协调抑制策略[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(8): 2302-2314.

- Zhang Chunxue, Li Canbing, Feng Wei, et al. A coordinated transient power fluctuation suppression strategy for power conversion system in islanded PV/storage microgrid [J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(8): 2302-2314 (in Chinese).
- [11] 王国玲, 刘旭, 李振宇, 等. 船舶光柴储交流微电网系统小信号的稳定性研究[J]. 船舶工程, 2018, 40(2): 67-72, 82.  
Wang Guoling, Liu Xu, Li Zhenyu, et al. Stability study of small signal of marine diesel-PV-battery AC microgrid system [J]. Ship Engineering, 2018, 40(2): 67-72, 82 (in Chinese).
- [12] 梁海峰, 董玥, 郑灿. 基于下垂控制的逆变器参数对微电网稳定性的影响研究[J]. 电力建设, 2018, 39(8): 119-127.  
Liang Haifeng, Dong Yue, Zheng Can. Influence of inverter parameters based on droop control on microgrid stability [J]. Electric Power Construction, 2018, 39(8): 119-127 (in Chinese).
- [13] 徐柏榆, 马明, 李玘, 等. 一种可抑制环流的微电网逆变器并联控制策略[J]. 太阳能学报, 2017, 38(3): 789-797.  
Xu Baiyu, Ma Ming, Li Ding, et al. A paralleling control strategy of microgrid inverters to restrain circulating current [J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2017, 38(3): 789-797 (in Chinese).
- [14] 龙军, 郑宇琦, 卢泉, 等. 基于Z源电力弹簧和简化情感控制的微电网电压和频率控制方法[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(4): 118-124.  
Long Jun, Zheng Yuqi, Lu Quan, et al. Voltage and frequency control method of microgrid based on Z-source ES and simplified BELBIC [J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(4): 118-124 (in Chinese).
- [15] 霍现旭, 吴盼, 黄鑫, 等. 基于自适应参数虚拟同步机的微电网稳定控制[J]. 电力建设, 2019, 40(2): 79-86.  
Huo Xianxu, Wu Pan, Huang Xin, et al. Research on stability control of microgrid applying virtual synchronous generator with adaptive parameters [J]. Electric Power Construction, 2019, 40(2): 79-86 (in Chinese).



李庆军

## 作者简介:

李庆军(1971-),男,硕士,高级工程师。研究方向:电力工程建设管理。E-mail: lqjun1971xx@126.com。

邵建豪(1984-),男,博士,讲师。研究方向:地理信息系统、遥感影像智能解译。E-mail: taijianhao@huel.edu.cn。

范越(1970-),男,通信作者,博士,教授级高级工程师。研究方向:电力系统及其自动化。E-mail: lqjun1971xx@126.com。

崔章顺(1981-),男,本科,高级工程师。研究方向:电力工程数字化技术。E-mail: zscui@eppei.com。